

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СУЛЕМА ЄВГЕНІЯ СТАНІСЛАВІВНА



УДК 004.62 : 004.043

**МЕТОДИ, МОДЕЛІ ТА ЗАСОБИ ОБРОБКИ
МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ДАНИХ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ
ДОСЛІДЖУВАНИХ ОБ'ЄКТІВ**

01.05.03 – математичне та програмне забезпечення
обчислювальних машин і систем

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор

Дичка Іван Андрійович,

декан факультету прикладної математики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Литвин Василь Володимирович

Національний університет «Львівська політехніка» МОН України,
завідувач кафедри інформаційних систем та мереж;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Сініцин Ігор Петрович

Інститут програмних систем НАН України,
завідувач відділу інформаційно-аналітичного забезпечення систем
організаційного управління;

доктор технічних наук, професор

Зибін Сергій Вікторович

Національний авіаційний університет МОН України,
в. о. завідувача кафедри інженерії програмного забезпечення.

Захист відбудеться «16» листопада 2020 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.02 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 18, ауд. 516.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «12» жовтня 2020 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент

М. М. Орлова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Реалії сучасного світу спонукають до необхідності подальшої інформатизації суспільства. Аварії на ЧАЕС, АЕС Фукусіма-1 (Японія), заводи хімічних відходів м. Кельце (Польща) тощо, а також пандемія COVID-2019 наочно продемонстрували, що в деяких ситуаціях є необхідність у дистанційному форматі участі людини у вирішенні виробничих задач. При цьому може виникати потреба у наданні людині (оператору, керівнику, користувачу тощо) всебічної інформації, що сприймається органами чуття людини, для забезпечення повноцінного заглиблення в ситуацію.

Для вирішення задач, що пов'язані з ризиком або обмеженням можливості безпосередньої участі людини, є доцільним застосування технології цифрових двійників (*digital twins*) та технології мультимедіа (*multimedia*). Розроблення нового класу програмних систем на основі цих технологій дозволить підвищити ефективність людської діяльності в складних або нестандартних умовах.

Технологія цифрових двійників розроблена фахівцями Національного агентства з авіації та дослідження космічного простору США для інженерії та виробництва, але основна її ідея може бути адаптована для інших галузей людської діяльності. Оскільки цифровий двійник характеризується не лише технічними параметрами або поведінковими даними, але й візуальною моделлю, то доцільно розвивати технологію цифрових двійників у взаємозв'язку з технологією мультимедіа, яка передбачає оперування не лише аудіо-візуальними даними, але й даними додаткових модальностей, які передають інші типи інформації, що сприймаються органами чуття людини. Це дозволить синергетично посилити можливості обох технологій та сприятиме розробленню програмних систем нового класу для вирішення людиною широкого кола задач у дистанційному форматі.

Створенням теоретичних основ та науково-практичним застосуванням технології цифрових двійників займаються науковці Grieves M., Vickers J., Glaessgen E. H., Stargel D., Schroeder G. N., Палагін О. В., Петренко Т. Г., Праховнік Н. А. та інші. Фахівцями, які проводять наукові дослідження у галузі мультимедіа, є Ghinea G., Murray N., Muntean G.-M., Andres F., Timmerer C., Lin W., Flynn R., Hines A., Moran K., Abreu R., Mattos D. P. та інші.

Незважаючи на наявність достатньої кількості науково-технічних рішень на основі технології цифрових двійників, на сьогодні відсутній системний підхід до вирішення задачі створення цифрових двійників досліджуваних об'єктів, який враховував би всі аспекти застосування цієї технології при проектуванні програмних систем: від розроблення моделей і методів обробки мультимодальних даних до забезпечення ущільненого подання та конфіденційного зберігання даних. Тому в роботі пропонується комплексний підхід до вирішення задач розроблення програмного забезпечення систем обробки темпоральних мультимодальних даних цифрових двійників досліджуваних об'єктів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, представлені у дисертації, проводились в рамках держбюджетних

науково-дослідних робіт Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» «Математичні та програмні методи оброблення мультимодальних даних моніторингу медико-біологічних об'єктів для діагностики стану здоров'я пацієнтів» (номер державної реєстрації 0120U102134) та «Розроблення та дослідження методів оброблення, розпізнавання, захисту та зберігання медичних зображень в розподілених комп'ютерних системах» (номер державної реєстрації 0117U004267); ініціативної науково-дослідної роботи «Методи та засоби обробки, захисту та пошуку мультимедійних даних у комп'ютерних системах та мережах» (реєстраційний номер 0114U003948); міжнародного наукового проекту «Future eHealth powered by 5G» (номер державної реєстрації 0118U100449); проекту програми Horizon2020 «Approximation Methods for Molecular Modelling and Diagnosis Tools» (реєстраційний номер 645672); проекту програми FP7 «EU-Ukrainian Mathematicians for Life Sciences» (реєстраційний номер 295164).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності обробки темпоральних мультимодальних даних у комп'ютерних системах.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі **задачі**.

1. Дослідити можливість та доцільність спільного застосування технології цифрових двійників та технології мультимедіа для подання та обробки темпоральних мультимодальних даних досліджуваних об'єктів.
2. Розробити метод створення мультиобrazу досліджуваного об'єкта для формальної специфікації моделей цифрового двійника.
3. Розробити метод синхронізації мультиобrazів, в тому числі, із застосуванням нечіткої логіки для вирішення задач з нечітко визначеними вхідними даними.
4. Розробити апарат алгебраїчної системи агрегатів для формального опису досліджуваного об'єкта.
5. Розробити моделі цифрового двійника для комплексного подання інформації про досліджуваний об'єкт на різних рівнях абстракції.
6. Розробити парадигму програмування та моделі обчислень для забезпечення ефективної обробки темпоральних мультимодальних даних та спрощення процесу розроблення програмного забезпечення систем обробки даних цифрових двійників досліджуваних об'єктів.
7. Розробити спеціалізовану мову програмування для обробки темпоральних мультимодальних даних цифрового двійника досліджуваного об'єкта.
8. Розробити архітектуру програмної системи для обробки темпоральних мультимодальних даних цифрових двійників та дослідити можливість її застосування для вирішення прикладних задач у галузі охорони здоров'я та у галузі освіти.

Об'єкт дослідження – процеси обробки темпоральних мультимодальних даних досліджуваних об'єктів.

Предмет дослідження – методи обробки та моделі подання темпоральних мультимодальних даних у комп'ютерних системах.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач

використовуються основні положення: теорії алгоритмів та теорії програмування – для розроблення парадигми програмування, моделей обчислень та мови програмування; нечіткої логіки – для подання нечітких значень у алгебраїчній системі агрегатів; інтервальної алгебри Аллена – для формалізації відношень дискретних інтервалів; методів комп’ютерної графіки, теорії інформації і кодування – для розроблення методу адаптивного ущільнення графічних даних; методів захисту даних – для розроблення методу подання мультимодальних конфіденційних даних цифрових двійників; теорії програмних систем та методів системного аналізу – для розроблення архітектури програмних систем обробки темпоральних мультимодальних даних цифрових двійників.

Наукова новизна одержаних результатів. Дістали подальший розвиток основи побудови програмного забезпечення систем обробки темпоральних мультимодальних даних цифрових двійників досліджуваних об’єктів.

1. *Уперше* для формальної специфікації моделей цифрового двійника розроблено метод створення мультиобразу досліджуваного об’єкта, який полягає в послідовному виконанні процедур формування структури даних, декомпозиції мультиобразу на набір часткових мультиобразів, підготовки темпоральних мультимодальних даних, об’єднанні, сортуванні та проріджуванні даних, що дає змогу розробляти універсальне програмне забезпечення систем обробки даних цифрових двійників досліджуваних об’єктів.
2. *Уперше* розроблено метод синхронізації мультиобразів, який ґрунтується на застосуванні інтервальних відношень, виконанні правил синхронізації, в тому числі нечіткої, а також процедур формування шаблону синхронізації, впорядкування мультиобразів, попарної синхронізації мультиобразів, що робить можливим виконання консолідованої обробки інформації, яка надходить від довільної кількості досліджуваних об’єктів.
3. *Уперше* для опису досліджуваного об’єкта розроблено алгебраїчну систему, що задається трьома множинами – множиною елементів (агрегатів), множиною операцій та множиною відношень, яка відрізняється від існуючих врахуванням порядку слідування елементів при виконанні операцій, введенням операцій впорядкування та спеціальних відношень (частотних, інтервальних) між елементами, що дає змогу спростити алгоритмічно-програмне забезпечення систем обробки темпоральних мультимодальних даних, в тому числі нечітко визначених.
4. *Уперше* для подання темпоральних мультимодальних даних цифрового двійника досліджуваного об’єкта розроблено моделі цифрового двійника – муксельну модель, часову зв’язну модель та багаторівневу онтологічну модель, що уможливорює використання різних рівнів абстракції для отримання комплексного опису досліджуваного об’єкта.
5. *Уперше* розроблено парадигму програмування, визначальною рисою якої є використання нової сутності – мультиобразу досліджуваного об’єкта як основного компонента обчислювального процесу, що дозволяє спростити процес розроблення програмного забезпечення систем обробки темпоральних

мультимодальних даних цифрових двійників досліджуваних об'єктів.

6. *Уперше* розроблено мову програмування ASAMPL (Algebraic System of Aggregates, Multimodal Processing Language), яка реалізує новорозроблену парадигму програмування, і спеціалізовані команди якої оперують мультимедіями та їх компонентами, що дає змогу отримувати програмний код з поліпшеними метриками.
7. *Уперше* запропоновано архітектуру програмної системи для обробки темпоральних мультимодальних даних цифрових двійників, особливістю якої є використання дворівневої процедури синхронізації та агрегації даних, що дозволяє спростити процес розроблення прикладного програмного забезпечення систем обробки темпоральних мультимодальних даних. Запропонована архітектура може бути основою для розроблення програмного забезпечення медичних діагностичних систем, а також онлайн-лабораторій та імерсійних середовищ у галузі освіти.

Практичне значення одержаних результатів. Одержані результати можуть бути застосовані для створення нового класу програмного забезпечення на основі технології цифрових двійників, зокрема, для розроблення медичних експертних систем нового покоління з розширеними можливостями щодо обробки та аналізу даних медичної діагностики, для розроблення систем дистанційного навчання на основі технології цифрових двійників та технології мультимедіа. Теоретичні та практичні результати роботи впроваджено у Національній медичній академії післядипломної освіти імені П. Л. Шупіка (акт про впровадження від 12.12.2019 р.), ТОВ «Відео Інтернет Технології» (акт про впровадження від 18.12.2019).

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційного дослідження, які представлені до захисту, одержані автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача є наступним: [1, 18, 19, 72] – розроблено методи обробки темпоральних мультимодальних даних та апарат алгебраїчної системи агрегатів; [8, 10, 12] – розроблено парадигму програмування мультимедіа, моделі обчислень, синтаксис та семантику мови програмування ASAMPL; [6, 11] – розроблено моделі подання темпоральних мультимодальних даних; [17, 32, 33, 34, 36, 44, 45, 48, 52, 66] – розроблено архітектуру програмного забезпечення цифрових двійників; [4, 7, 13, 15, 16, 20, 21, 23, 27, 29–31, 35, 42, 43, 46, 47, 49, 51, 53, 58–62, 64, 65, 67] – розроблено методику обробки мультимедійних та мультимедійних даних; [3, 5, 14, 22, 24–26, 28, 50, 54–57, 63, 71] – розроблено методику подання конфіденційних мультимодальних даних; [37, 41] – виконано аналіз можливості застосування технології мультимедіа. Решта робіт написана без співавторів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати проведених у дисертаційній роботі досліджень доповідались та обговорювались на 31 міжнародній та всеукраїнській науково-технічній конференції: International Conference on Interactive Mobile Communication, Technologies and Learning IMCL2019, IMCL2017, IMCL2015 (Thessaloniki, Greece, 2019, 2017, 2015), International Conference on Interactive Collaborative and Blended Learning

ICBL2019 (Santiago de Cuba, Cuba, 2019), 24th International Conference «European Wireless» EW2018 (Catania, Italy, 2018), International Conference on Advanced Computer Information Technologies ACIT 2018 (Ceske Budejovice, Czechia, 2018), International Workshop on Multimedia Information and Communication Technologies Redžúr 2018, Redžúr 2017, Redžúr 2016 (Bratislava, Slovakia, 2018, 2017, 2016), Symposium on Remote Engineering Virtual Instrumentation REV2018, REV2004 (Duesseldorf, Germany, 2018, Villach, Austria, 2004), International Symposium ELMAR-2017, ELMAR-2016 (Zadar, Croatia, 2017, 2016), 23rd IEEE International Conference on Systems, Signals and Image Processing IWSSIP2016 (Bratislava, Slovakia, 2016), 3rd International Conference Health Technology Management HTM-2016 (Chisinau, Moldova, 2016), «AMMODIT and final EUMLS Workshop» (Hasenwinkel, Germany, 2016), International conference «Information Technology. Problems and Solutions» (Ufa, Russia, 2013), IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics AQTR 2010 (Cluj-Napoca, Romania, 2010), IEEE International Conference East-West Design & Test International Symposium EWDTS'09 (Moscow, Russia, 2009), International Conference on Interactive Computer Aided Learning ICL2007, ICL2006, ICL2005 (Villach, Austria, 2007, 2006, 2005), International Conference Information Technologies for Rural Development (Jelgava, Latvia, 2006), 10th International Netties Conference (St. Pölten, Austria, 2005), 6-й міжнародній науково-практичній конференції з сучасних проблем кодування, захисту й ущільнення інформації (Вінниця, Україна, 2017), міжнародній конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій» АПКТ-2014, АПКТ-2012, АПКТ-2011 (Хмельницький, Україна, 2014, 2012, 2011), міжнародній науково-технічній конференції «Системний аналіз та інформаційні технології» SAIT 2011 (Київ, Україна, 2011), міжнародній науково-технічній конференції «Современные информационные и электронные технологии» (Одесса, Україна, 2009), XVI міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика-2009» (Чернівці, Україна, 2009).

Публікації. Результати досліджень за тематикою дисертації опубліковано у 72 наукових працях. Основні наукові результати опубліковано у 26 наукових працях, з яких 1 монографія; 25 наукових статей (в тому числі 6 наукових статей у закордонних виданнях, проіндексованих у наукометричній базі Scopus, з яких 4 статті в журналах 3-го квартіля (Q3) та 1 стаття в журналі 4-го квартіля (Q4); 19 статей у наукових фахових виданнях України, в тому числі 1 стаття у журналі категорії А). Результати роботи також представлено у 7 статтях (в тому числі 1 стаття у іноземному виданні та 6 статей опубліковано у наукових виданнях України) та у 39 матеріалах наукових та науково-технічних конференцій (в тому числі у 10 матеріалах закордонних наукових конференцій, що реферуються наукометричними базами Scopus та/або Web of Science, і у 29 матеріалах інших наукових конференцій в Україні та за кордоном).

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Робота містить 277 сторінок основного тексту, 9 таблиць, 52 рисунки, 367 найменувань використаних джерел, 2 додатки. Загальний обсяг дисертації становить 343 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено об'єкт та предмет дослідження, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, наведено інформацію щодо впровадження результатів роботи, їх зв'язок з науково-дослідними роботами та міжнародними науковими проєктами, наведено дані щодо публікацій та апробації результатів дисертації.

У **першому розділі** проведено дослідження методів, моделей і програмних засобів обробки даних за технологією цифрових двійників та технологією мультимедіа, а також парадигм програмування для розроблення програмних систем обробки темпоральних мультимодальних даних.

Цифровий двійник є комплексною віртуальною моделлю досліджуваного об'єкта (фізичного двійника), що складається з візуальної моделі об'єкта, поведінкової моделі об'єкта та повністю відображає його характеристики у динаміці протягом певного періоду часу.

Технологія мультимедіа (*mulsemidia*) реалізує людино-центрований підхід, що передбачає реєстрацію, подання, обробку та відтворення мультимодальної інформації, яка сприймається людиною через органи чуття.

Проведений аналіз сучасного стану вирішення проблеми подання та обробки мультимодальних даних цифрових двійників досліджуваних об'єктів дозволяє зробити висновок про необхідність і доцільність розроблення нових методів, моделей та засобів для вирішення задачі подання та обробки темпоральних мультимодальних даних цифрового двійника для опису досліджуваного об'єкта, в тому числі із застосуванням технології мультимедіа.

У **другому розділі** сформульовано основні вимоги до математичного апарату для формальної специфікації моделей цифрового двійника досліджуваного об'єкта та розроблено апарат алгебраїчної системи агрегатів, що дозволяє вирішити проблеми, пов'язані з поданням та обробкою темпоральних мультимодальних даних. *Темпоральні мультимодальні дані* – це взаємопов'язані дані, що надходять від об'єкта у процесі його дослідження, характеризують різні аспекти досліджуваного об'єкта та змінюються з плином часу.

Алгебраїчна система агрегатів (АСА) – це алгебраїчна система, носієм якої є непуста множина об'єктів, які називатимемо *агрегатами*. Агрегат A – це впорядкована скінченна сукупність елементів, яка визначається кортежем множин $\{A\}$ та кортежем кортежів елементів $\langle A \rangle$, причому елементи a_i^j кожного кортежу елементів $\langle a_i^j \rangle_{i=1}^{n_j} \in \langle A \rangle$ належать до відповідної множини $M_j \in \{A\}$, $j = [1 \dots N]$, що задає взаємно-однозначний зв'язок між порядком слідування множин та порядком слідування кортежів елементів:

$$A = \llbracket M_j | \langle a_i^j \rangle_{i=1}^{n_j} \rrbracket_{j=1}^N = \llbracket \{A\} | \langle A \rangle \rrbracket, \quad (1)$$

де $\{A\}$ – кортеж множин M_j ; $\langle A \rangle$ – кортеж кортежів елементів $\langle a_i^j \rangle_{i=1}^{n_j}$;

a_i^j – окремий елемент (значення) або складений елемент (кортеж однорідних значень або кортеж різнорідних значень), $a_i^j \in M_j$.

Визначальними рисами агрегата, які відрізняють цю математичну абстракцію від інших, є наступні:

- агрегат є складеним математичним об'єктом, всі компоненти якого є впорядкованими;
- елементами кортежів, з яких складається агрегат, можуть бути окремі значення, кортежі однорідних значень та/або кортежі різнорідних значень.

Агрегат A_\emptyset , який не містить жодного компонента, називатимемо *нуль-агрегатом*. Нуль-агрегат відіграє в АСА роль *нейтрального елемента*.

Порядок слідування множин і відповідних їм кортежів в агрегаті є важливим – саме він визначає, як будуть виконуватись операції над агрегатами. Визначимо це через поняття *сумісності* агрегатів.

Агрегати A_1 та A_2 є *сумісними*, $A_1 \doteq A_2$, якщо вони мають однакову довжину, а тип та порядок слідування множин в них збігаються:

$$\begin{cases} |A_1| = |A_2| \\ \{A_1\} \equiv \{A_2\}. \end{cases} \quad (2)$$

Агрегати A_1 та A_2 є *квазісумісними*, $A_1 \doteq A_2$, якщо тип та порядок слідування множин в них збігаються частково, при цьому немає вимоги щодо рівності довжин цих агрегатів:

$$\begin{cases} \{A_1\} \not\equiv \{A_2\} \\ \{A_1\} \cap \{A_2\} \neq \emptyset. \end{cases} \quad (3)$$

Агрегати A_1 та A_2 є *несумісними*, $A_1 \not\equiv A_2$, якщо тип та порядок слідування множин в них не збігаються:

$$\{A_1\} \cap \{A_2\} = \emptyset. \quad (4)$$

Агрегати A_1 та A_2 є *приховано сумісними*, $A_1 (\doteq) A_2$, якщо обидва агрегати мають однаковий набір множин, але їх порядок слідування відрізняється:

$$\begin{cases} \{A_1\} \not\equiv \{A_2\} \\ |A_1| = |A_2| = N \\ \forall M_j \subset \{A_k\}, \end{cases} \quad (5)$$

де $j = [1, \dots, N]$, $k = [1, 2]$.

Операції над агрегатами та їх компонентами включають: логічні операції, операції впорядкування, арифметичні операції.

Логічними операціями над агрегатами є: об'єднання (\cup), переріз (\cap), різниця (\setminus), симетрична різниця (Δ) та виключний переріз (\neg).

Розглянемо операцію об'єднання, застосувавши її до таких агрегатів:

$$\begin{aligned} A_1^1 &= \llbracket M_1, M_2, \dots, M_N | \langle a_1^1, a_2^1, \dots, a_l^1 \rangle, \langle b_1^1, b_2^1, \dots, b_m^1 \rangle, \dots, \langle w_1^1, w_2^1, \dots, w_n^1 \rangle \rrbracket, \\ A_2^1 &= \llbracket M_1, M_2, \dots, M_N | \langle a_1^2, a_2^2, \dots, a_r^2 \rangle, \langle b_1^2, b_2^2, \dots, b_q^2 \rangle, \dots, \langle w_1^2, w_2^2, \dots, w_p^2 \rangle \rrbracket; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} A_1^2 &= \llbracket M_1^1, M_2^1, \dots, M_N^1 | \langle a_1, a_2, \dots, a_l \rangle, \langle b_1, b_2, \dots, b_m \rangle, \dots, \langle w_1, w_2, \dots, w_n \rangle \rrbracket, \\ A_2^2 &= \llbracket M_1^2, M_2^2, \dots, M_K^2 | \langle c_1, c_2, \dots, c_r \rangle, \langle d_1, d_2, \dots, d_q \rangle, \dots, \langle z_1, z_2, \dots, z_p \rangle \rrbracket; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} A_1^3 &= \llbracket M_1, M_2^1, \dots, M_x, \dots, M_N^1 | \langle a_1^1, a_2^1, \dots, a_l^1 \rangle, \langle b_1, b_2, \dots, b_m \rangle, \dots, \\ &\quad \langle f_1^1, f_2^1, \dots, f_t^1 \rangle, \dots, \langle w_1, w_2, \dots, w_n \rangle \rrbracket, \\ A_2^3 &= \llbracket M_1, M_2^2, \dots, M_x, \dots, M_K^2 | \langle a_1^2, a_2^2, \dots, a_r^2 \rangle, \langle d_1, d_2, \dots, d_q \rangle, \dots, \\ &\quad \langle f_1^2, f_2^2, \dots, f_v^2 \rangle, \dots, \langle z_1, z_2, \dots, z_p \rangle \rrbracket. \end{aligned} \quad (8)$$

Об'єднанням двох агрегатів є агрегат, який містить елементи кортежів, які належать обом агрегатам та впорядковані за таким правилом залежно від типу сумісності агрегатів.

1. Якщо дані агрегати A_1^1 та A_2^1 , визначені (6), такі, що $A_1^1 \doteq A_2^1$, то елементи i -го кортежу агрегата A_2^1 додають у кінець i -го кортежу агрегата A_1^1 :

$$\begin{aligned} B = A_1^1 \cup A_2^1 &= \llbracket M_1, M_2, \dots, M_N | \langle a_1^1, a_2^1, \dots, a_l^1, a_1^2, a_2^2, \dots, a_r^2 \rangle, \\ &\quad \langle b_1^1, b_2^1, \dots, b_m^1, b_1^2, b_2^2, \dots, b_q^2 \rangle, \dots, \langle w_1^1, w_2^1, \dots, w_n^1, w_1^2, w_2^2, \dots, w_p^2 \rangle \rrbracket. \end{aligned} \quad (9)$$

2. Якщо дані агрегати A_1^2 та A_2^2 , визначені (7), такі, що $A_1^2 \doteq A_2^2$, то кортеж кортежів агрегата A_2^2 додають у кінець кортежу кортежів агрегата A_1^2 , а кортеж множин агрегата A_2^2 додають у кінець кортежу множин агрегата A_1^2 :

$$\begin{aligned} B = A_1^2 \cup A_2^2 &= \llbracket M_1^1, M_2^1, \dots, M_N^1, M_1^2, M_2^2, \dots, M_K^2 | \langle a_1, a_2, \dots, a_l \rangle, \\ &\quad \langle b_1, b_2, \dots, b_m \rangle, \dots, \langle w_1, w_2, \dots, w_n \rangle, \langle c_1, c_2, \dots, c_r \rangle, \\ &\quad \langle d_1, d_2, \dots, d_q \rangle, \dots, \langle z_1, z_2, \dots, z_p \rangle \rrbracket. \end{aligned} \quad (10)$$

3. Якщо дані агрегати A_1^3 та A_2^3 , визначені (8), такі, що $A_1^3 \doteq A_2^3$, то:

- а) елементи i -го кортежу агрегата A_2^3 додають у кінець i -го кортежу агрегата A_1^3 , якщо елементи цих кортежів належать до тієї самої i -ї множини;
- б) для всіх i -х кортежів, елементи яких належать до різних множин, кортеж кортежів агрегата A_2^3 додають у кінець кортежу кортежів агрегата A_1^3 , а кортеж множин агрегата A_2^3 додають у кінець кортежу множин агрегата A_1^3 , за винятком кортежів, які підпадають під дію правила а) та виключаються з кортежу кортежів:

$$B = A_1^3 \cup A_2^3 = \llbracket M_1, M_2^1, \dots, M_x, \dots, M_N^1, M_2^2, \dots, M_K^2 | \langle a_1^1, a_2^1, \dots, a_l^1, a_1^2, a_2^2, \dots, a_r^2 \rangle, \langle b_1, b_2, \dots, b_m \rangle, \dots, \langle f_1^1, f_2^1, \dots, f_t^1, f_1^2, f_2^2, \dots, f_v^2 \rangle, \dots, \langle w_1, w_2, \dots, w_n \rangle, \langle d_1, d_2, \dots, d_q \rangle, \dots, \langle z_1, z_2, \dots, z_p \rangle \rrbracket. \quad (11)$$

Логічні операції в АСА є некомутативними, оскільки порядок слідування компонентів є важливим. Це відрізняє логічні операції над агрегатами та логічні операції над множинами.

Операціями впорядкування є розміщення (\models), сортування (\uparrow та \downarrow), проріджування (\parallel), видалення (\bowtie) та вставлення (\bowtie).

Операція розміщення перевпорядковує кортеж множин та кортеж кортежів агрегата A відповідно до порядку слідування кортежу множин та кортежу кортежів шаблонного агрегата A_{tem} . Нехай агрегат A визначений як $A = \llbracket M_3, M_1, M_2, \dots, M_N | \langle a_{i_3}^3 \rangle_{i_3=1}^{n_3}, \langle a_{i_1}^1 \rangle_{i_1=1}^{n_1}, \langle a_{i_2}^2 \rangle_{i_2=1}^{n_2}, \dots, \langle a_{i_N}^N \rangle_{i_N=1}^{n_N} \rrbracket$ та нехай $A_{tem} = \llbracket M_1, M_2, M_3, \dots, M_N | \langle _ \rangle \rrbracket$. Тоді результатом операції розміщення є агрегат:

$$B = A \models A_{tem} = \llbracket \{A_{tem}\} | \langle A \rangle \rrbracket = \llbracket M_1, M_2, M_3, \dots, M_N | \langle a_{i_1}^1 \rangle_{i_1=1}^{n_1}, \langle a_{i_2}^2 \rangle_{i_2=1}^{n_2}, \langle a_{i_3}^3 \rangle_{i_3=1}^{n_3}, \dots, \langle a_{i_N}^N \rangle_{i_N=1}^{n_N} \rrbracket. \quad (12)$$

Теорема 1 (про сумісність). Якщо $\widehat{A_1} = A_1 \models A_2$ та $\widehat{A_2} = A_2 \models A_1$, то $\widehat{A_1} \div A_2$ та $\widehat{A_2} \div A_1$ для $\forall A_1, \forall A_2$, таких, що $A_1 (\div) A_2$.

Наслідок з теореми 1. Внаслідок застосування операції розміщення приховано сумісні агрегати стають сумісними.

Операція *сортування* (за зростанням та за спаданням) дозволяє отримати новий – відсортований – порядок слідування елементів певного кортежу, який називатимемо *первісним*. Результатом застосування операції *сортування* є агрегат, у всіх кортежах якого елементи перевпорядковані відповідно до нового порядку слідування елементів первісного кортежу.

Операція *проріджування* дозволяє вилучити з первісного кортежу агрегата однакові значення, що розташовані поруч; одночасно вилучаються елементи з тими самими індексами у всіх інших кортежах.

Операція *видалення* дозволяє вилучити певний елемент з агрегата.

Операція *вставлення* дозволяє додати певний елемент в агрегат.

Таким чином, операції впорядкування, визначені в АСА, дозволяють перевпорядковувати елементи у кортежах та кортежі в агрегатах.

Арифметичні операції можуть виконуватись лише над елементами та кортежами елементів, які належать до числових множин. Арифметичними операціями над елементами є додавання, віднімання, множення, ділення. Арифметичними операціями над кортежами є поелементне додавання, поелементне віднімання, поелементне множення, поелементне ділення.

Відношення в АСА включають відношення між елементами, відношення між кортежами та відношення між агрегатами. Відношеннями між елементами є

відношення *більше* ($>$), *менше* ($<$), *дорівнює* ($=$), *передую* ($<$), *слідую* за ($>$). Відношення між кортежами належать до таких категорій: арифметичні відношення, частотні відношення, інтервальні відношення. Арифметичні відношення виконуються поелементно та включають відношення *строго більше* ($>$), *мажоритарно більше* ($>>$), *строго менше* ($<$), *мажоритарно менше* ($<<$), *строго дорівнює* ($=$) та *мажоритарно дорівнює* ($<>$).

Частотні відношення можуть бути застосовані до двох кортежів $\overline{a^1}$ та $\overline{a^2}$, де $\overline{a^1} = \langle a_{i_1}^1 \rangle_{i_1=1}^{n_1}$ та $\overline{a^2} = \langle a_{i_2}^2 \rangle_{i_2=1}^{n_2}$, якщо $a_{i_1}^1 \in M$ та $a_{i_2}^2 \in M$. Частотні відношення включають відношення *частіше* ($>$), *рідше* ($<$) та *однаково часто* (\sim).

Інтервальні відношення включають відношення *передую*, *настає після*, *збігається з*, *стикається з початком*, *стикається з кінцем*, *перекриває*, *перекривається*, *відбувається під час*, *містить*, *починає*, *починається з*, *закінчує*, *закінчується* та *відбувається між*. Інтервальні відношення можуть бути застосовані лише до кортежів, які є дискретними інтервалами. Інтервальні відношення ґрунтуються на відношеннях інтервальної алгебри Аллена. Суттєва відмінність інтервальних відношень в АСА від інтервальної алгебри Аллена полягає у тому, що, на відміну від інтервальної алгебри Аллена, яка оперує неперервними інтервалами, інтервальні відношення в АСА застосовуються до *дискретних інтервалів* або *дискретних інтервалів без повторень*.

В АСА також передбачено використання нечітких значень. Нечітке значення \tilde{a}_i є опуклою та нормалізованою нечіткою підмножиною множини \mathbb{R} , що характеризується функцією належності $a_i(x)$, наприклад, визначеною як:

$$a_i(x) = \begin{cases} f_L & (a_i - \varepsilon_i) \leq x < a_i \\ 1 & x = a_i \\ f_R & a_i < x \leq (a_i + \varepsilon_i) \\ 0 & \text{в інших випадках,} \end{cases} \quad (13)$$

де ε_i – чітке значення похибки вимірювання; $f_L = \frac{x - a_i + \varepsilon_i}{\varepsilon_i}$ та $f_R = \frac{a_i + \varepsilon_i - x}{\varepsilon_i}$ – функції, що визначають лівий та правий край нечіткого числа відповідно.

Тоді, визначення агрегату (1) для нечіткого випадку має вигляд:

$$A = \left[\left[\tilde{M}_j | \left((a_i^j - \varepsilon_i^j), a_i^j, (a_i^j + \varepsilon_i^j) \right) \right]_{i=1}^{n_j} \right]_{j=1}^N. \quad (14)$$

Для нечітких значень визначено нечіткі аналоги операцій АСА.

У **третьому розділі** запропоновано концепцію мультиобразу для формальної специфікації моделей цифрового двійника та розроблено методи обробки і моделі подання темпоральних мультимодальних даних цифрового двійника, а саме: метод створення мультиобразу досліджуваного об'єкта, метод синхронізації мультиобразів, метод адаптивного ущільнення графічних даних цифрового двійника, метод конфіденційного зберігання даних цифрового двійника та моделі цифрового двійника: муксельну модель, часову зв'язну

модель та багаторівневу онтологічну модель.

Мультиобраз є основою моделей цифрового двійника для подання темпоральних мультимодальних даних, які характеризують та визначають досліджуваний об'єкт. В математичному сенсі *мультиобраз* – це непустий агрегат виду:

$$I = \llbracket T, M_1, \dots, M_N | \langle t_1, \dots, t_\tau \rangle, \langle a_1^1, \dots, a_{n_1}^1 \rangle, \dots, \langle a_1^N, \dots, a_{n_N}^N \rangle \rrbracket, \quad (15)$$

де T – це множина значень часу; $\tau \geq n_i, i \in [1, \dots, N]$.

Теорема 2 (*про достатню умову квазісумісності агрегатів*). Якщо агрегати I_1 та I_2 є мультиобразами, то $I_1 \doteq I_2$.

Наслідок з теореми 2. Оскільки мультиобрази є квазісумісними агрегатами, до них можуть застосовуватись операції та відношення, визначені в алгебраїчній системі агрегатів.

Розглянемо метод створення мультиобразу. Вхідними даними для методу створення мультиобразу є набори темпоральних даних та тип (модальність) даних кожного набору. Метод включає сім етапів. Результатом застосування методу є мультиобраз досліджуваного об'єкта, поданий у вигляді впорядкованої сукупності темпоральних мультимодальних даних.

На першому етапі методу формують специфікацію мультиобразу досліджуваного об'єкта, виходячи із задачі, що вирішується.

На другому етапі виконують декомпозицію мультиобразу на набір *часткових* мультиобразів виду:

$$I_j = \llbracket T, M_j | \langle t_1, \dots, t_{\tau_j} \rangle, \langle a_1, \dots, a_{n_j} \rangle \rrbracket, \quad (16)$$

де T – це множина значень часу; M_j – множина даних j -ї модальності; $\tau_j, n_j \in \mathbb{N}$; $\tau_j \geq n_j$; $j \in [1, \dots, N]$; N – кількість наборів даних.

На третьому етапі забезпечують отримання даних.

На четвертому етапі здійснюють підготовку даних кожної модальності з метою формування відповідного часткового мультиобразу.

На п'ятому етапі об'єднують часткові мультиобрази у єдиний мультиобраз. Процедура об'єднання мультиобразів включає наступні дії.

1. Нормалізація часткових мультиобразів. *Нормалізованим* мультиобразом (*нормалізованим* кортежем) називатимемо мультиобраз (кортеж), до елементів якого додано фіктивні елементи. *Фіктивним* елементом називатимемо деяке унікальне значення, яке відсутнє у кортежі до виконання нормалізації; як фіктивний може використовуватись пустий елемент (\emptyset), невизначений елемент або будь-яке інше унікальне значення; на інших етапах роботи з мультиобразом (аналіз, відтворення тощо) фіктивні елементи ігноруються.

$$\begin{aligned}\hat{I}_j &= I_j \bowtie \left(\langle \emptyset \rangle_{k=1}^{E_i^j} \succ a_{n_j}^j \right) = \left[\left[T, M_j \mid \langle t_i \rangle_{i=1}^{\tau_j}, \langle \langle a_{i_j}^j \rangle_{i_j=1}^{n_j}, \langle \emptyset \rangle_{l=1}^{E_i^j} \rangle \right] \right] = \\ &= \left[\left[T, M_j \mid \langle t_i \rangle_{i=1}^{\tau_j}, \langle \hat{a}_{i_j}^j \rangle_{i_j=1}^{n_j+E_i^j} \right] \right],\end{aligned}\quad (17)$$

де \bowtie – операція вставлення; E_i^j – кількість фіктивних елементів;

$E_i^j = (\sum_{j=1}^N \tau_j) - n_j$; $\hat{a}_{i_j}^j$ – елемент нормалізованого кортежу; $j \in [1, \dots, N]$.

2. Об'єднання нормалізованих часткових мультиобразів:

$$I = \cup_{j=1}^N \hat{I}_j = \left[\left[T, M_1, \dots, M_N \mid \langle \langle t_i \rangle_{i=1}^{\tau_j} \rangle_{j=1}^N, \langle \hat{a}_{i_1} \rangle_{i_1=1}^{n_1+E_i^1}, \dots, \langle \hat{a}_{i_N} \rangle_{i_N=1}^{n_N+E_i^N} \right] \right]. \quad (18)$$

На шостому етапі виконують сортування мультиобразу, отриманого на попередньому етапі, за кортежем часових значень:

$$I_S = I \uparrow \bar{t} = \left[\left[T, M_1, \dots, M_N \mid \langle \langle t_\sigma \rangle_{\sigma=1}^{\tau_j} \rangle_{j=1}^N, \langle \hat{a}_{\sigma_1} \rangle_{\sigma_1=1}^{n_1+E_i^1}, \dots, \langle \hat{a}_{\sigma_N} \rangle_{\sigma_N=1}^{n_N+E_i^N} \right] \right], \quad (19)$$

де \uparrow – операція сортування (за зростанням); σ та σ_j – індекси, що задають порядок слідування елементів у відсортованому кортежі; $j \in [1, \dots, N]$.

На сьомому етапі виконують проріджування відсортованого мультиобразу, отриманого на попередньому етапі, за кортежем часових значень:

$$I_S = I \parallel \bar{t} = \left[\left[T, M_1, \dots, M_N \mid \langle t_\sigma \rangle_{\sigma=1}^{(\sum_{j=1}^N \tau_j) - \delta}, \langle \hat{a}_{\sigma_1} \rangle_{\sigma_1=1}^{n_1+E_i^1 - \delta}, \dots, \langle \hat{a}_{\sigma_N} \rangle_{\sigma_N=1}^{n_N+E_i^N - \delta} \right] \right], \quad (20)$$

де \parallel – операція проріджування; δ – кількість відкинутих дублікатів значень часу.

Внаслідок застосування методу отримують мультиобраз як впорядковану сукупність даних, що характеризують досліджуваний об'єкт.

Синхронізація мультиобразів є основною складовою обробки темпоральних мультимодальних даних, якщо досліджуваних об'єктів декілька. Розглянемо метод синхронізації мультиобразів, який ґрунтується на застосуванні інтервальних відношень та виконанні правил синхронізації, які поділяються на: універсальне правило, базові правила, правила нечіткої синхронізації. Для зручності кожному правилу присвоєно власний шифр (наприклад, БП8).

Нехай потрібно виконати синхронізацію двох мультиобразів:

$$\begin{aligned}I_1 &= \left[\left[T, M_1 \mid \langle t_{i_1}^1 \rangle, \langle a_{i_1}^1 \rangle \right] \right]_{i_1=1}^{n_1} \\ I_2 &= \left[\left[T, M_2 \mid \langle t_{i_2}^2 \rangle, \langle a_{i_2}^2 \rangle \right] \right]_{i_2=1}^{n_2}.\end{aligned}\quad (21)$$

Внаслідок синхронізації отримуємо два мультиобрази, які визначені виразами (22).

$$\begin{aligned} I_1^S &= \llbracket T, M_1 \mid \langle t_i \rangle, \langle d_i^1 \rangle \rrbracket_{i=1}^n \\ I_2^S &= \llbracket T, M_2 \mid \langle t_i \rangle, \langle d_i^2 \rangle \rrbracket_{i=1}^n, \end{aligned} \quad (22)$$

де d_i^1 та d_i^2 – значення, що належать нормалізованим кортежам елементів мультиобразів I_1 та I_2 відповідно; $n = n_1 + n_2 - \delta$; δ – кількість дублікатів значень часу в об’єднаному кортежі $\langle t_i \rangle_{i=1}^n$ часових значень.

Універсальне правило синхронізації мультиобразів УП1 має вигляд:

$$\begin{aligned} \langle t_i \rangle_{i=1}^{n_1+n_2-\delta} &= \left(\left(\left(\langle t_{i_1}^1 \rangle_{i_1=1}^{n_1} \cup \langle t_{i_2}^2 \rangle_{i_2=1}^{n_2} \right) \uparrow \right) \parallel \right), \\ d_i^1 &= \begin{cases} a_{i_1}^1 & \text{якщо } t_i = t_{i_1}^1, \forall i, \forall i_1 \\ \emptyset & \text{в інших випадках,} \end{cases} \\ d_i^2 &= \begin{cases} a_{i_2}^2 & \text{якщо } t_i = t_{i_2}^2, \forall i, \forall i_2 \\ \emptyset & \text{в інших випадках,} \end{cases} \end{aligned} \quad (23)$$

де \cup – операція об’єднання, \uparrow – операція сортування, \parallel – операція проріджування.

Базові правила синхронізації БП1–БП72 залежать від типу інтервальних відношень між кортежами часових значень. Розглянемо приклад базового правила. Нехай $e_d(\bar{t}^1, \bar{t}^2) = \text{true}$, тобто \bar{t}^1 та \bar{t}^2 зв’язані відношенням збігається з; це означає, що визначення значень обох кортежів даних \bar{a}^1 та \bar{a}^2 відбувалось одночасно. Тоді, якщо $n_1 \bmod 2 = 0$, $\bar{t}^1 \sim \bar{t}^2$, $t_i^1 < t_i^2$, $t_{i+1}^1 < t_{i+1}^2$ та $t_{i+1}^1 > t_i^2$, $\forall i \in [2 \dots (n_1 - 2)]$, $i \bmod 2 = 0$, то синхронізація даних виконується за правилом БП6, яке визначено (24), де $j = 2i$, $n = 2(n_1 - 1)$.

$$\begin{aligned} t_1 &= t_1^1 & t_{j-2} &= t_i^1 & t_{j-1} &= t_i^2 & t_j &= t_{i+1}^1 & t_{j+1} &= t_{i+1}^2 & t_n &= t_{n_1}^1 \\ d_1^1 &= a_1^1 & d_{j-2}^1 &= a_i^1 & d_{j-1}^1 &= \emptyset & d_j^1 &= a_{i+1}^1 & d_{j+1}^1 &= \emptyset & d_n^1 &= a_{n_1}^1 \\ d_1^2 &= a_2^2 & d_{j-2}^2 &= \emptyset & d_{j-1}^2 &= a_i^2 & d_j^2 &= \emptyset & d_{j+1}^2 &= a_{i+1}^2 & d_n^2 &= a_{n_2}^2. \end{aligned} \quad (24)$$

Для визначення складних закономірностей у кортежах часових значень пропонується використовувати *шаблон синхронізації*, що визначений форматом:

$$\begin{aligned} \text{шаблон_синхронізації} &= [\text{“ШС”}, \text{номер_шаблону}, \text{“=”},] (\text{“УП”} \mid \text{“БП”} \mid \text{“НП”}), \\ &\quad \text{номер_правила}, [\text{“ (“}, \text{номер_елемента}, \text{“,”} \mid \text{“–”}, \\ &\quad \text{номер_елемента}, \text{”}) \text{ “} \{ \text{“\&”}, (\text{“УП”} \mid \text{“БП”} \mid \text{“НП”}), \\ &\quad \text{номер_правила}, \text{“ (“}, \text{номер_елемента}, \text{“,”} \mid \text{“–”}, \\ &\quad \text{номер_елемента}, \text{”}) \text{ “} \}] \end{aligned}$$

Наприклад, запис БП60(1,n)&БП15(2–(n-1)) означає, що шаблон синхронізації складається з двох правил: правила БП60, яке застосовується для синхронізації перших та останніх елементів (їх індекси $i = 1$ та $i = n$

відповідно), та правила БП15, яке застосовується для синхронізації всіх інших елементів (ці елементи мають індекси $i = [2 \dots (n - 1)]$).

Для спрощення процедури синхронізації мультимодальних даних у задачах, де визначення часу з деякою похибкою є припустимим, доцільно застосовувати *нечітку синхронізацію* даних. Правила нечіткої синхронізації НП1–НП4 ґрунтуються на нечітких інтервальних відношеннях, які визначаються відповідними нечіткими степенями близькості значень моментів часу t_i^1 та t_i^2 . Наприклад, степінь $eb_{(\alpha,\beta)}^{\ll}(\bar{t}^1, \bar{t}^2)$ показує, наскільки приблизно кінець кортежу \bar{t}^1 випереджає початок кортежу \bar{t}^2 , відповідно до (25).

$$eb_{(\alpha,\beta)}^{\ll}(\bar{t}^1, \bar{t}^2) = \bar{t}^1 \triangleleft_{I_{T_w}} L_{(\alpha,\beta)}^{\ll} \triangleright_{I_{T_w}} \bar{t}^2, \quad (25)$$

де оператор \triangleright_I означає *superproduct*-композицію, оператор \triangleleft_I означає *subproduct*-композицію T_w – t-норма Лукашевича, I_{T_w} – імплікатор Лукашевича, $L_{(\alpha,\beta)}^{\ll}$ – нечітке відношення між моментами часу t_1^1 та t_1^2 , α – кількість одиниць часу, β – припустиме відхилення значення α .

Теорема 3 (теорема про похибку). Нехай Δt – похибка вимірювання часу отримання даних, що очікуються у моменти часу t_i^1 та t_i^2 , тобто Δt є мінімальною відстанню між t_i^1 та t_i^2 . Тоді $eb_{(\alpha,\beta)}^{\ll}(t_i^1, t_i^2) = 0$, а моменти часу t_i^1 та t_i^2 є єдиним значенням нечіткого часу \tilde{t}_i .

Наслідок з теореми 3. Якщо похибка вимірювання часу у двох кортежах часових значень не перевищує мінімальної різниці часу, що може бути зафіксована, то можна замінити близькі значення у цих кортежах одним значенням.

Нехай значення α_1 є відстанню між t_i^1 та t_i^2 , значення α_2 є відстанню між t_i^2 та t_{i+1}^1 та значення α_3 є відстанню між t_{i+1}^1 та t_{i+1}^2 . Крім цього, нехай значення α є мінімальною відстанню між такими t_i^1 та t_i^2 , які можуть вважатись одним значенням нечіткого часу \tilde{t} . Якщо $\alpha_1 > \alpha$ та $\alpha_2 < \alpha$, то, незалежно від значення α_3 , правило нечіткої синхронізації даних НП3 має вигляд:

$$\begin{array}{lll} t_i = t_i^1 & \tilde{t}_{i+1} = t_{i+1}^2 & t_{i+2} = t_{i+1}^2 \\ d_i^1 = a_i^1 & d_{i+1}^1 = a_{i+1}^1 & d_{i+2}^1 = \emptyset \\ d_i^2 = \emptyset & d_{i+1}^2 = a_i^2 & d_{i+2}^2 = a_{i+1}^2. \end{array} \quad (26)$$

Сформулюємо метод синхронізації мультиобразів, зокрема, процедуру синхронізації, що лежить у його основі. Вхідними даними для методу є мультиобрази I_1, \dots, I_K ($K \geq 2$), припустима похибка визначення часу Δt та тип кожної послідовності часових значень. Результатом застосування методу є синхронізовані мультиобрази I_1^S, \dots, I_K^S . Під *синхронізованими* розумітимемо мультиобрази, для яких виконуються такі умови:

- всі кортежі всіх мультиобразів мають однакову довжину;
- часові кортежі у всіх мультиобразах є рівними;

- всі значення у кортежах мультимодальних даних є узгодженими зі значеннями часових кортежів так, що i -й елемент у кожному кортежі кожного мультимодального образу відповідає i -му елементу в часовому кортежі будь-якого мультимодального образу.

Метод передбачає виконання декількох проходів. Кількість проходів P залежить від кількості K мультимодальних образів, які потрібно синхронізувати:

$$P = \lceil \log_2 K \rceil, \quad (27)$$

де $\lceil x \rceil$ – операція округлення x до найближчого більшого цілого.

На кожному з P проходів виконуються два етапи.

Перший етап розпочинають з визначення довжини n_k часового кортежу $\langle t_i^{(k)} \rangle_{i=1}^{n_k}$ кожного мультимодального образу I_k :

$$I_k = \left[T, M_1^{(k)}, \dots, M_{N_k}^{(k)} \mid \langle t_i^{(k)} \rangle_{i=1}^{n_k}, \langle a_i^{(k),1} \rangle_{i=1}^{n_k}, \dots, \langle a_i^{(k),N_k} \rangle_{i=1}^{n_k} \right], \quad (28)$$

де $k = [1 \dots K]$; K – кількість мультимодальних образів, що потребують синхронізації.

Далі список із K мультимодальних образів впорядковують за зростанням довжини часового кортежу та поділяють на дві частини, які утворюють дві групи мультимодальних образів: до першої групи входять $\left\lfloor \frac{K}{2} \right\rfloor$ мультимодальних образів з меншою довжиною часового кортежу, до другої групи – $\left\lceil \frac{K}{2} \right\rceil$ мультимодальних образів з більшою довжиною часового кортежу, де $\lfloor x \rfloor$ – операція округлення x до найближчого меншого цілого.

На другому етапі виконують процедуру попарної синхронізації мультимодальних образів. Пару мультимодальних образів утворюють з p -го мультимодального образу першої групи $I_{p,I}$ та p -го мультимодального образу другої групи $I_{p,II}$, де $p = \left[1 \dots \left\lfloor \frac{K}{2} \right\rfloor \right]$, тобто отримують пару $\langle I_{p,I}, I_{p,II} \rangle$. При цьому, якщо $K \bmod 2 \neq 0$, то непарний мультимодальний образ з другої групи вважають синхронізованим та передають його для подальшої обробки на наступний прохід застосування методу.

Під час синхронізації кожен кортеж часових значень $\langle t_i^{(k)} \rangle_{i=1}^{n_k}$ розглядають як послідовність дискретних інтервалів $\left[t_\tau^{(k)}, t_{\tau+1}^{(k)} \right]$, $\tau = [1 \dots (n_k - 1)]$.

Процедура синхронізації мультимодальних образів $I_{p,I}$ та $I_{p,II}$ включає такі дії.

1. Якщо $\Delta_{p,I} = \left[t_1^{(p,I)}, t_{n_{p,I}}^{(p,I)} \right]$ або $\Delta_{p,II} = \left[t_1^{(p,II)}, t_{n_{p,II}}^{(p,II)} \right]$ є неперіодичною послідовністю, то виконати синхронізацію даних за правилом УП1 та перейти до п. 11.
2. Інакше, встановити інтервальне відношення дискретних інтервалів $\Delta_{p,I} = \left[t_1^{(p,I)}, t_{n_{p,I}}^{(p,I)} \right]$ та $\Delta_{p,II} = \left[t_1^{(p,II)}, t_{n_{p,II}}^{(p,II)} \right]$ і виконати синхронізацію даних відповідно до встановленого відношення:

- 2.1. Якщо $b_d(\Delta_{p,I}, \Delta_{p,II}) = true$, то застосувати правило синхронізації даних для відношення *передуює* (правило БП61) та перейти до п. 11.
- 2.2. Якщо $bi_d(\Delta_{p,I}, \Delta_{p,II}) = true$, то застосувати правило синхронізації даних для відношення *настає після* (правило БП62) та перейти до п. 11.
- 2.3. Якщо $m_d(\Delta_{p,I}, \Delta_{p,II}) = true$, то застосувати правило синхронізації для відношення *стикається з початком* (правило БП63) та перейти до п. 11.
- 2.4. Якщо $mi_d(\Delta_{p,I}, \Delta_{p,II}) = true$, то застосувати правило синхронізації даних для відношення *стикається з кінцем* (правило БП64) та перейти до п. 11.
- 2.5. Якщо $o_d(\Delta_{p,I}, \Delta_{p,II}) = true$, то застосувати правило синхронізації даних для відношення *перекриває* (правило БП65) та перейти до п. 11.
- 2.6. Якщо $oi_d(\Delta_{p,I}, \Delta_{p,II}) = true$, то застосувати правило синхронізації даних для відношення *перекривається* (правило БП66) та перейти до п. 11.
- 2.7. Інакше, перейти до п. 3.
3. Визначити дискретне значення $t_1^{(p,I)}$.
4. Якщо $\exists t_\alpha^{(p,II)}$ таке, що $t_\alpha^{(p,II)} \leq t_1^{(p,I)}$, то застосувати до $\left[t_1^{(p,I)} \right]$ та $\left[t_1^{(p,II)} t_\alpha^{(p,II)} \right]$ правило синхронізації БП61 ($t_\alpha^{(p,II)} < t_1^{(p,I)}$) та/або правило синхронізації УП1 ($t_\alpha^{(p,II)} = t_1^{(p,I)}$).
5. Якщо $\exists t_\beta^{(p,II)}$ таке, що $t_\beta^{(p,II)} > t_2^{(p,I)}$, то застосувати до $\left[t_1^{(p,I)} \right]$ та $\left[t_\beta^{(p,II)} t_{n_{p,II}}^{(p,II)} \right]$ правило синхронізації БП62.
6. Визначити дискретний інтервал $\left[t_1^{(p,I)} t_2^{(p,I)} \right]$.
7. Визначити дискретний інтервал $\left[t_\alpha^{(p,II)} t_\beta^{(p,II)} \right]$ такий, що $t_\alpha^{(p,II)} > t_1^{(p,I)}$ та $t_\beta^{(p,II)} \leq t_2^{(p,I)}$.
8. Встановити інтервальне відношення дискретних інтервалів $\left[t_1^{(p,I)} t_2^{(p,I)} \right]$ і $\left[t_\alpha^{(p,II)} t_\beta^{(p,II)} \right]$ та визначити базові правила синхронізації (якщо $\Delta t = 0$) або правило нечіткої синхронізації (якщо $\Delta t > 0$), умови яких виконуються для встановленого відношення.
9. Сформувати шаблон синхронізації дискретних інтервалів $\left[t_1^{(p,I)} t_2^{(p,I)} \right]$ та $\left[t_\alpha^{(p,II)} t_\beta^{(p,II)} \right]$.
10. Відповідно до визначеного шаблону синхронізації виконати синхронізацію мультимодальних даних, що визначені для дискретних інтервалів $\left[t_\tau^{(p,I)} t_{\tau+1}^{(p,I)} \right]$ та $\left[t_\alpha^{(p,II)} t_\beta^{(p,II)} \right]$ для $\forall \tau, 1 < \tau < n_{p,I}$ та $\exists \alpha, \beta$ таких, що $t_\alpha^{(p,II)} > t_\tau^{(p,I)}$ та $t_\beta^{(p,II)} \leq t_{\tau+1}^{(p,I)}$.
11. Сформувати синхронізовані мультиобрази $I_1^{S(P)}, \dots, I_K^{S(P)}$.

Процедуру синхронізації виконують для всіх $\left\lfloor \frac{K}{2} \right\rfloor$ пар мультиобразів, після чого виконують наступний з P проходів методу.

Результатом виконання всіх проходів методу є синхронізовані мультиобрази I_1^S, \dots, I_K^S , готові для подальшої обробки згідно з цільовою функцією дослідження цифрових двійників досліджуваних об'єктів.

Цифровий двійник подають у програмній системі через дані, які отримують у процесі спостереження за фізичним двійником – досліджуваним об'єктом. Ці дані можуть розглядатись на різних рівнях абстракції, виходячи з мети дослідження фізичного двійника. Залежно від контексту конкретної вирішуваної задачі цифровий двійник може відображати фізичний двійник як:

- суцільний об'єкт, що може бути неоднорідним за своєю будовою, матеріалом, фізичними властивостями тощо;
- об'єкт, що визначається набором динамічно змінюваних станів;
- об'єкт, що є композицією своїх складових, кожна з яких в свою чергу може розглядатись як окремий об'єкт, утворюючи ієрархію об'єктів.

Для подання даних цифрового двійника на різних рівнях абстракції в роботі запропоновано три моделі: муксельну модель, часову зв'язну модель та багаторівневу онтологічну модель подання мультимодальних даних.

Муксельна модель ґрунтується на понятті мукселя (*mixel*, від *multimodal element*) як одиничного елемента впорядкованої сукупності мультимодальних даних. Муксель є узагальненням таких понять як піксель (одиничний елемент растрової графіки), воксель (одиничний елемент воксельної графіки) та доксель (воксель, визначений у часі). Муксельна модель цифрового двійника досліджуваного об'єкта ґрунтується на декомпозиції простору об'єкта (рис. 1).

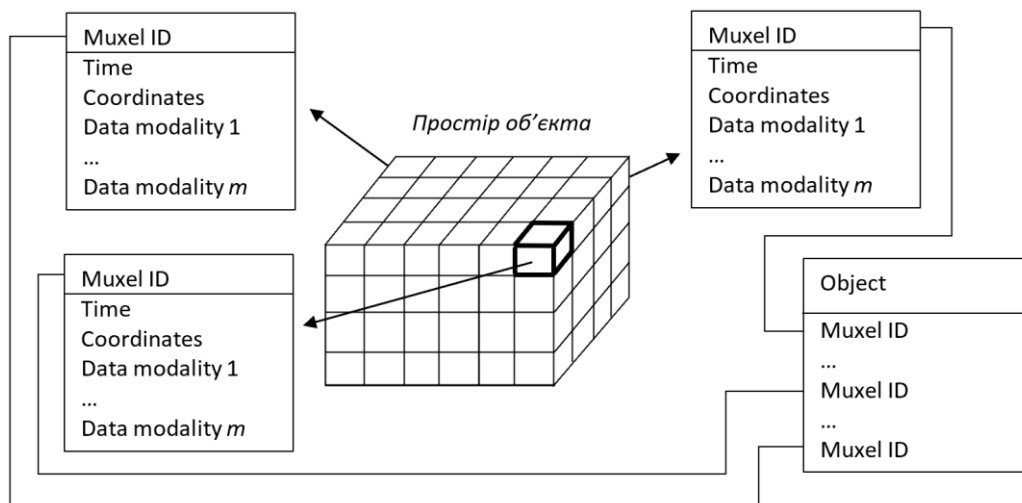


Рис. 1. Муксельна модель цифрового двійника досліджуваного об'єкта

Створення муксельної моделі цифрового двійника досліджуваного об'єкта передбачає наступні етапи. На першому етапі формують структуру даних мультиобразу, який описує муксель досліджуваного об'єкта. Внаслідок виконання цього етапу отримують специфікацію мультиобразу. На другому етапі виконують опис структури об'єкта. На третьому етапі забезпечують отримання темпоральних мультимодальних даних та формування їх

впорядкованої сукупності на основі структур, визначених на першому та другому етапах.

Часова зв'язна модель подає досліджуваний об'єкт через сукупність його дискретних станів, що визначаються в унікальні моменти часу набором характеристик об'єкта, які є мультимодальними даними. У кожен момент часу в об'єкта є тільки один стан, який визначається його мультиобразом. При цьому часовий кортеж кожного мультиобразу містить лише одне значення, яке визначає момент часу, в який об'єкт має певний конкретний стан. Це дозволяє використовувати часове значення як ключ, що однозначно визначає цей стан у впорядкованій послідовності станів досліджуваного об'єкта (рис. 2).

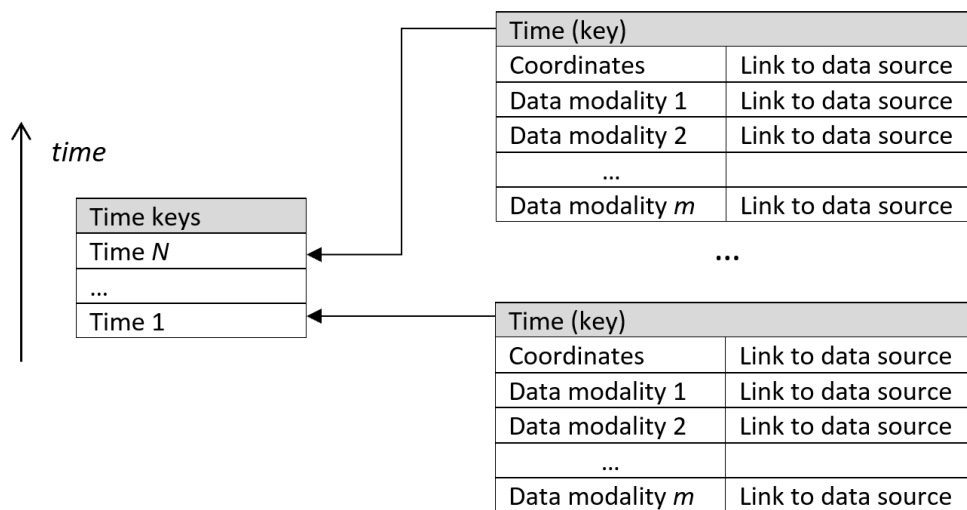


Рис. 2. Часова зв'язна модель досліджуваного об'єкта

Для створення часової зв'язної моделі потрібно визначити структуру мультиобразу досліджуваного об'єкта. При цьому мультиобраз для часової зв'язної моделі відрізняється тим, що його часовий кортеж містить лише одне значення часу, яке асоціюється з даними інших модельностей, що визначають стан досліджуваного об'єкта. Стани об'єкта є дискретними; це означає, що на уявній часовій шкалі фіксації станів об'єкта визначаються окремі дискретні моменти часу (часові ключі), з якими асоціюються конкретні стани об'єкта. При визначенні кожного дискретного стану дані, що асоційовані з цим дискретним моментом часу, синхронізуються та агрегуються в єдиний набір даних.

У багаторівневій онтологічній моделі досліджуваний об'єкт подають як композицію його складових (компонентів). Кожен компонент об'єкта характеризується певними мультисемедійними властивостями та поведінковими параметрами, які визначаються відповідними мультимодальними даними. Компоненти багаторівневої онтологічної моделі пов'язані семантично, оскільки вони разом утворюють певну систему, якою є досліджуваний об'єкт, що визначається на макрорівні опису об'єкта. Компоненти моделі є різними за своєю функціональністю, призначенням, будовою тощо, тому для їх опису потрібна певна деталізація, яка визначається на мікрорівні опису об'єкта. Ця деталізація

Запропоновано процедуру шифрування даних з використанням палітри значень та процедуру стеганографічного приховування даних з використанням булевих функцій.

У **четвертому розділі** розроблено парадигму програмування мультимедіа та моделі обчислень, які її конкретизують, а також мову програмування ASAMPL, що реалізує цю парадигму програмування.

Парадигма програмування мультимедіа спрямована на вирішення задач обробки темпоральних мультимодальних даних, для яких характерні такі основні особливості.

1. При отриманні (визначенні, вимірюванні, генерації) мультимодальних даних фіксується момент часу, коли це отримання відбулось.
2. Дані певної модальності, які характеризують досліджуваний об'єкт, розглядаються та обробляються сукупно з даними інших модальностей, що характеризують той самий об'єкт.
3. Дані надходять з різнорідних джерел та у довільних форматах.

Парадигма програмування мультимедіа, як методологія створення програмного забезпечення, полягає в тому, що розробник має враховувати взаємозв'язок даних з точки зору *інтервалу часу* їх існування (отримання, визначення, генерації, вимірювання тощо) та *модальності* даних, тобто оперувати такою сутністю як *мультимедіа* об'єкта. Структура даних для опису мультимедіа має бути визначена у частині програмного коду, з якої починається вирішення задачі обробки даних. Логіка вирішення задачі має ґрунтуватись на операціях та відношеннях, що визначені для мультимедіа як математичного об'єкта, тобто на апараті алгебраїчної системи агрегатів.

Характерними особливостями парадигми програмування мультимедіа є наступні.

1. Основною сутністю, на якій ґрунтується подання та обробка даних у програмі, є мультимедіа.
2. Синхронізація та агрегація даних різних модальностей є основою моделі обчислення для обробки даних мультимедіа.
3. Процес обробки ґрунтується на врахуванні властивості темпоральності даних.
4. Обробка мультимедіа здійснюється з використанням операцій та відношень, визначених в алгебраїчній системі агрегатів.

Розглянемо моделі обчислень, які конкретизують запропоновану парадигму програмування.

У базовій моделі обчислень (рис. 4) мультимедіа є ключовою абстракцією, яка використовується на двох рівнях: на рівні обробки окремих вхідних темпоральних даних (часткові мультимедіа) та на рівні формування єдиної синхронізованої та агрегованої сукупності темпоральних мультимодальних даних (мультимедіа об'єкта).

На першому рівні мультимедіа визначається як агрегат, що складається з двох кортежів: кортежу часових значень (часових міток) та кортежу даних певної модальності. На цьому рівні відбувається первинна синхронізація даних – синхронізація часових міток та даних модальності, для якої вони визначені.

Таким чином, структура мультиобразу першого рівня є типовою. На другому рівні мультиобраз визначає спосіб агрегації всіх мультимодальних даних у вигляді однієї сукупності даних. На третьому рівні схеми базової моделі обчислень здійснюється цільова обробка даних.

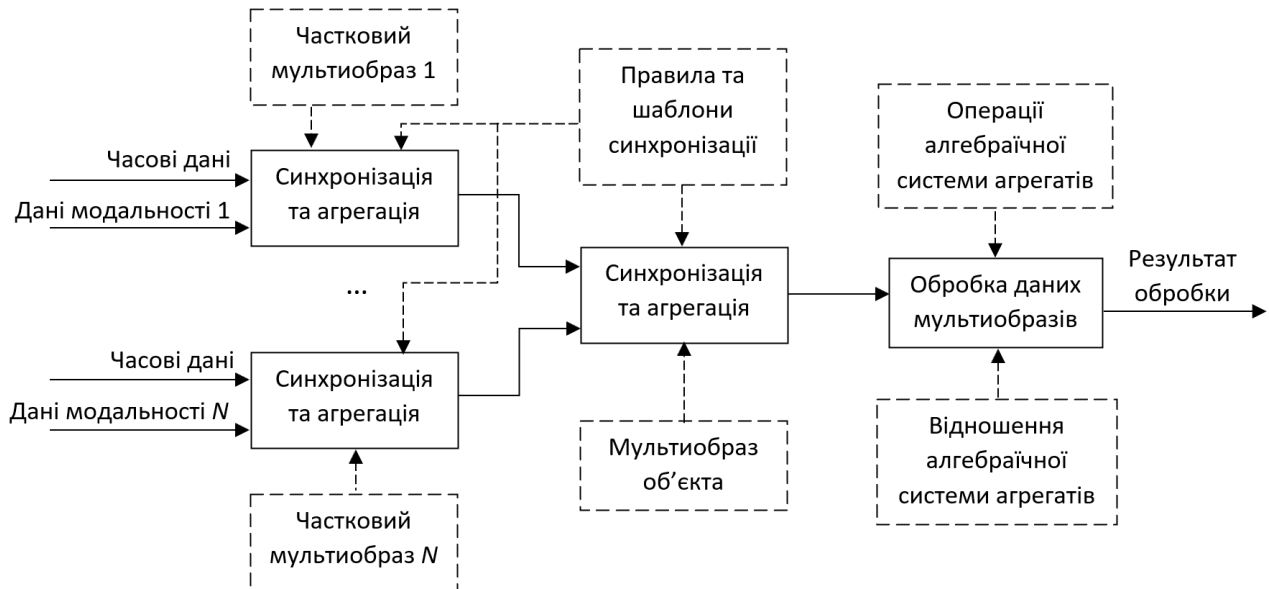


Рис. 4. Схема базової моделі обчислень

Модель обчислень для технології цифрових двійників відрізняється від базової моделі обчислень введенням додаткового – середнього, рівня ієрархічної процедури синхронізації та агрегації (рис. 5), на якому відбувається синхронізація та агрегація мультимодальних даних у межах однієї окремої моделі: візуальної та поведінкової.

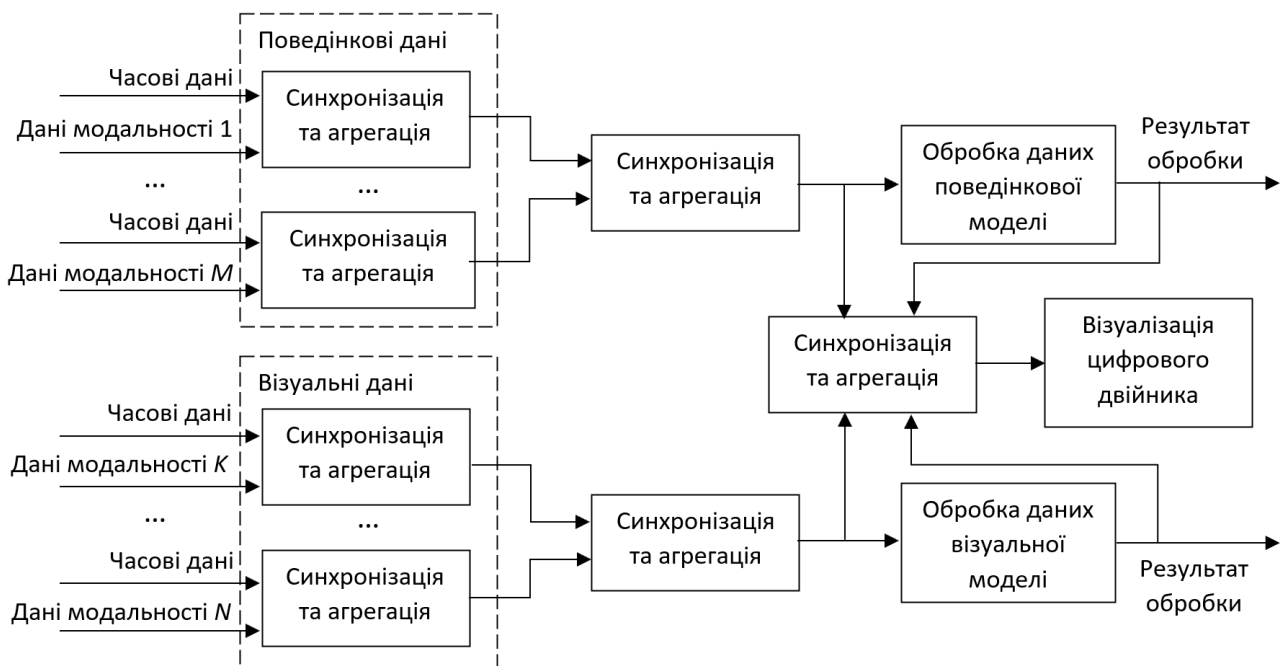


Рис. 5. Схема моделі обчислень для технології цифрових двійників

Запропонована парадигма програмування може бути реалізована як за допомогою універсальних мов програмування, так і за допомогою мови програмування ASAMPL, розробленої в цьому дослідженні.

Мова програмування ASAMPL є спеціалізованою мовою програмування, призначеною для обробки мультимедійних та мультисемедійних даних. Характерною особливістю розробленої мови є спрощення обробки мультимодальних, зокрема, мультисемедійних даних, основною властивістю яких є темпоральність.

Ключовою в мові ASAMPL є концепція мультиобrazу досліджуваного об'єкта. Для подання мультиобrazу передбачені спеціальні структури даних – кортежі та агрегати. Обробка агрегатів виконується відповідно до правил, визначених в алгебраїчній системі агрегатів.

Основними особливостями мови ASAMPL є наступні.

1. Зв'язок процесу обробки даних з часовою шкалою.
2. Синхронізація даних різних модальностей.
3. Подання темпоральних мультимодальних даних у вигляді мультиобrazу за допомогою агрегатів та кортежів.
4. Зорієнтованість на одночасне використання різних джерел мультимодальних даних та різних форматів подання даних.
5. Використання апарату АСА для обробки мультиобrazів та їхніх компонентів.

Для обробки мультимодальних (мультисемедійних) даних у мові ASAMPL визначено наступні оператори: **TIMELINE**, **SEQUENCE**, **IF THEN**, **CASE OF**, **SUBSTITUTE FOR WHEN**, **DOWNLOAD FROM WITH**, **UPLOAD TO WITH**, **IS**, **RENDER WITH**.

Часовий оператор **TIMELINE** (**TIMELINE AS**, **TIMELINE UNTIL**) призначений для одночасного (паралельного) виконання дій протягом заданого періоду часу. Часовий оператор визначається синтаксичним правилом [SR1].

$$\begin{aligned} \text{часовий_оператор} = & \text{TIMELINE} , (\text{ідентифікатор} \mid \text{[SR1]} \\ & \text{значення_часу}) , ":" , (\text{ідентифікатор} \mid \text{значення_часу}) \\ & , ":" , (\text{ідентифікатор} \mid \text{значення_часу}) , "{" , \{ \\ & \text{оператор} \} , "}" \mid \text{TIMELINE} , \text{AS} , \\ & \text{кортеж_значень_часу} , "{" , \{ \text{оператор} \} , "}" \mid \\ & \text{TIMELINE} , \text{UNTIL} , \text{логічний_вираз} , "{" , \{ \text{оператор} \\ & \} , "}" ; \end{aligned}$$

Аксіоматична семантика операторів **TIMELINE**, **TIMELINE AS** та **TIMELINE UNTIL** визначається формулами [SF1]–[SF3], де P та Q визначають попереднє та наступне твердження, C_1, C_2, \dots, C_K визначають дії, які потрібно одночасно виконати у часовому операторі, a_1 та a_2 визначають час початку та кінця виконання часового оператора, Δa – крок зміни значень часу, $[a_1..a_n]$ – кортеж часових значень, x – поточне значення часу, B – умова, яка визначає завершення процесу виконання дій в операторі.

$$\frac{\{P \& (a_1 \leq x \leq a_2)\} C_1, C_2, \dots, C_K \{Q\}}{\{P\} \text{TIMELINE } (a_1 : \Delta a : a_2) C_1, C_2, \dots, C_K \{Q\}} \quad [\text{SF1}]$$

$$\frac{\{P \& (x \in [a_1..a_n])\} C_1, C_2, \dots, C_K \{Q\}}{\{P\} \text{TIMELINE AS } [a_1..a_n] C_1, C_2, \dots, C_K \{Q\}} \quad [\text{SF2}]$$

$$\frac{\{P \& B\} C_1, C_2, \dots, C_K \{Q\}}{\{P\} \text{TIMELINE UNTIL } B C_1, C_2, \dots, C_K \{Q\}} \quad [\text{SF3}]$$

Операційна семантика оператора TIMELINE визначається діаграмою станів, яка наведена на рис. 6, де Time1 та Time2 визначають час початку та кінця виконання часового оператора, Current_time визначає поточне значення часу, Action 1, ..., Action N визначають дії, які потрібно одночасно виконати у часовому операторі.

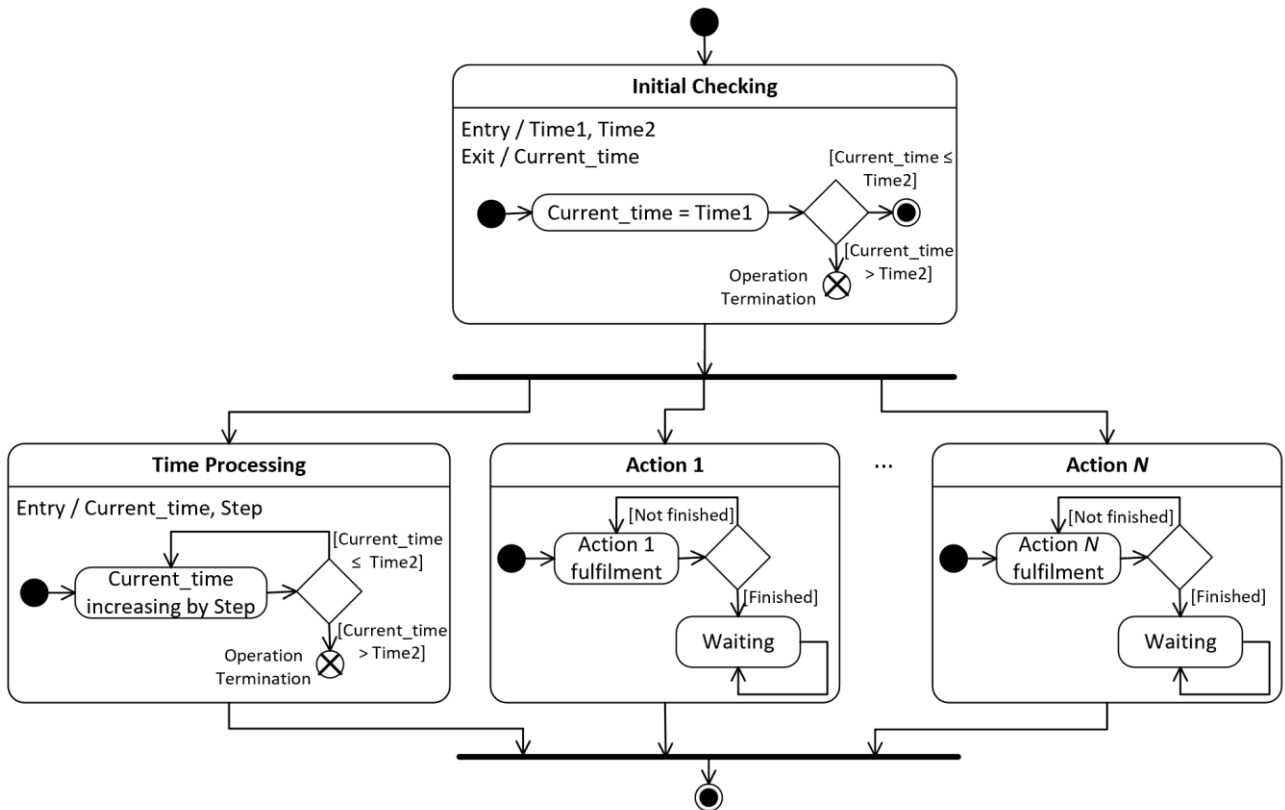


Рис. 6. Діаграма станів оператора TIMELINE

Операційна семантика оператора TIMELINE UNTIL визначається діаграмою станів, яка наведена на рис. 7, де Condition – це умова, яка визначає завершення процесу виконання дій в операторі, Action 1, ..., Action N визначають дії, які потрібно виконати одночасно.

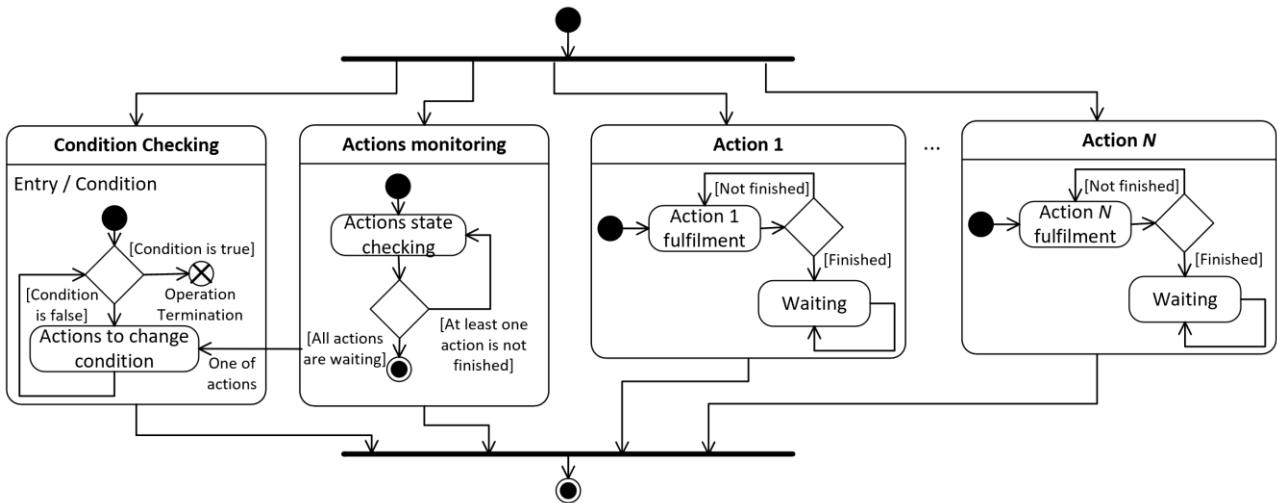


Рис. 7. Діаграма станів оператора TIMELINE UNTIL

Операційна семантика оператора TIMELINE AS визначається діаграмою станів, яка наведена на рис. 8, де $Time_1, \dots, Time_N$ визначають кортеж часових значень, $Iteration$ визначає номер поточної ітерації обчислень, $Action_1, \dots, Action_N$ визначають дії, які потрібно виконати одночасно.

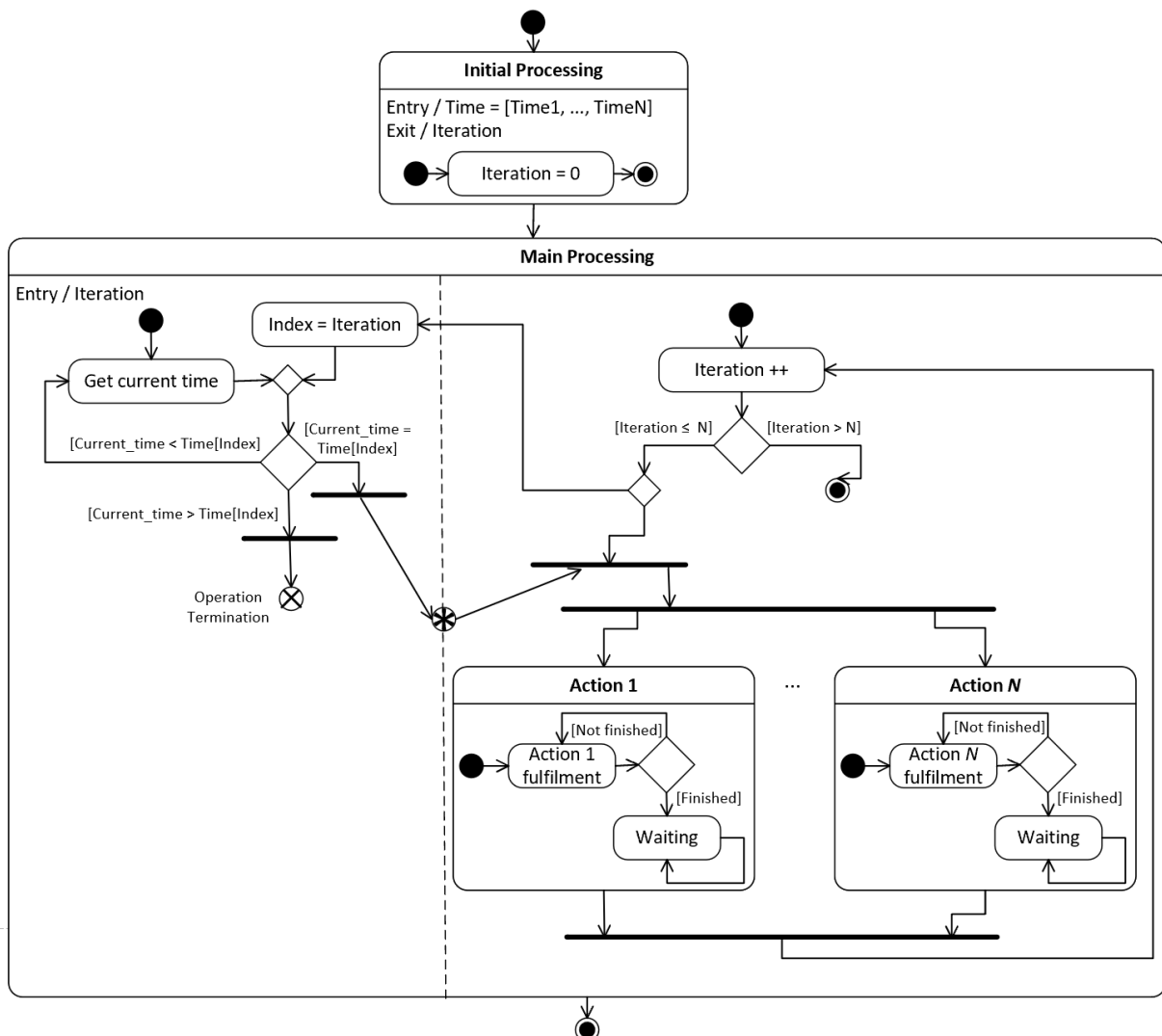


Рис. 8. Діаграма станів оператора TIMELINE AS

Оператор послідовної обробки SEQUENCE дозволяє об'єднувати дії з обробки даних, що виконуються одночасно, в одну комплексну дію. Оператор послідовної обробки визначається синтаксичним правилом [SR2].

$$\text{оператор_послідовного_оброблення} = \text{SEQUENCE}, \{ \{ \text{оператор}, [";"] \}, \{ "}" \} ; \quad [\text{SR2}]$$

Аксіоматична семантика оператора SEQUENCE визначається формулою [SF4], де P та R визначають попереднє та наступне твердження відповідно, Q_1, \dots, Q_{K-1} визначають проміжні твердження, C_1, C_2, \dots, C_K визначають дії, що потрібно послідовно виконати в операторі SEQUENCE.

$$\frac{\{P\} C_1 \{Q_1\}, \{Q_1\} C_2 \{Q_2\}, \dots, \{Q_{K-1}\} C_K \{R\}}{\{P\} \text{SEQUENCE } C_1, C_2, \dots, C_K \{R\}} \quad [\text{SF4}]$$

Операційна семантика оператора SEQUENCE визначається діаграмою станів, яка наведена на рис. 9, де Action 1, ..., Action N визначають дії, які потрібно виконати послідовно.

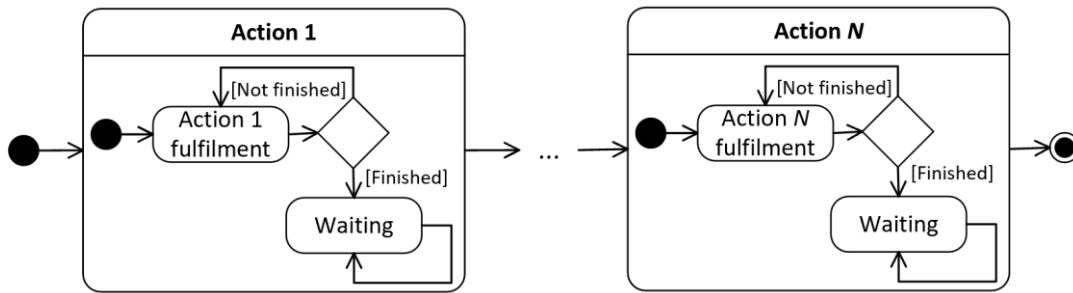


Рис. 9. Діаграма станів оператора SEQUENCE

Комбінування операторів TIMELINE (TIMELINE AS, TIMELINE UNTIL) та SEQUENCE дозволяє визначати особливий порядок оброблення даних.

Оператор заміни SUBSTITUTE FOR WHEN призначений для динамічної заміни одного набору темпоральних даних (мультимедіа) іншим при виконанні певної умови (наприклад, замінює дані високої роздільності даними низької роздільності, якщо дані високої роздільності не можуть бути завантажені, вивантажені або оброблені через низьку швидкість передавання даних, відсутність зв'язку з зовнішнім джерелом даних тощо). Цей оператор визначається синтаксичним правилом [SR3].

$$\text{оператор_заміни} = \text{SUBSTITUTE}, \text{ідентифікатор}, \text{FOR}, \text{ідентифікатор}, \text{WHEN логічний_вираз}; \quad [\text{SR3}]$$

Аксіоматична семантика оператора SUBSTITUTE FOR WHEN визначається формулою [SF5], де P та Q визначають попереднє та наступне твердження відповідно, C_1, C_2 визначають дії над даними, S_1, S_2 визначають

джерела даних, d визначає змінну, з якою асоціюються дані, B – умова вибору джерела даних.

$$\frac{\{P \& B\} C_1\{Q\}, \{P \& \bar{B}\} C_2\{Q\}, C_i \equiv (d = d_i)}{\{P\} d \text{ SUBSTITUTE } s_2 \text{ FOR } s_1 \text{ WHEN } B \{Q\}} \quad [\text{SF5}]$$

Операційна семантика оператора SUBSTITUTE FOR WHEN визначається діаграмою станів, яка наведена на рис. 10, де data_source_1 та data_source_2 визначають джерела даних.

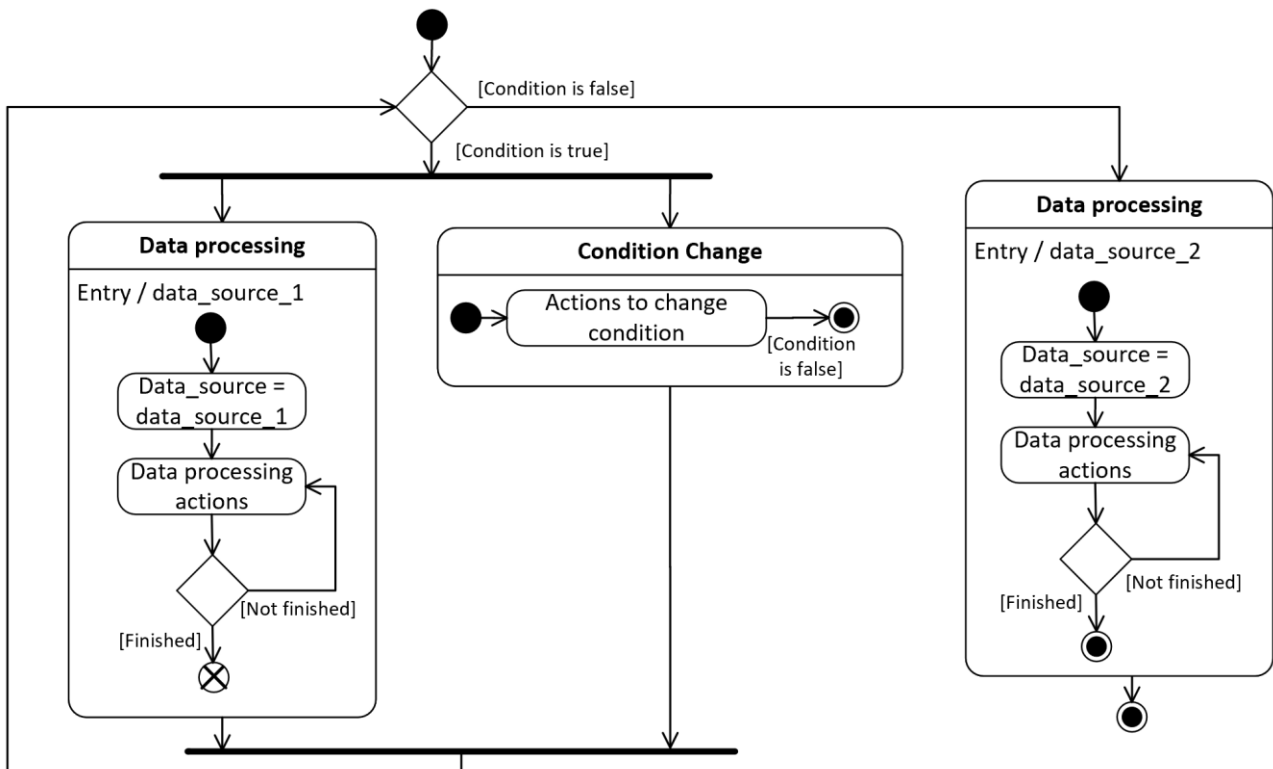


Рис. 10. Діаграма станів оператора SUBSTITUTE FOR WHEN

Оператор вивантаження DOWNLOAD FROM WITH призначений для отримання даних мультимедіа з певного джерела даних. Перетворення вхідних даних виконується з використанням визначеного обробника. Цей оператор визначається синтаксичним правилом [SR4].

$$\text{оператор_вивантаження} = \text{DOWNLOAD}, \text{ ідентифікатор}, \quad [\text{SR4}] \\ \text{FROM}, \text{ ідентифікатор} [\text{ WITH}, \text{ ідентифікатор}];$$

Аксіоматична семантика оператора DOWNLOAD FROM WITH визначається формулою [SF6], де P та Q – попереднє та наступне твердження відповідно, C визначає дію над даними, s визначає джерело даних, d визначає змінну, з якою асоціюються дані, z визначає процедуру конвертації даних (обробник).

$$\frac{\{P\} C \{Q\}}{\{P\} \text{DOWNLOAD } d \text{ FROM } s \text{ WITH } z \{Q\}} \quad [\text{SF6}]$$

Операційна семантика оператора DOWNLOAD FROM WITH визначається діаграмою станів, яка наведена на рис. 11, де data_source визначає джерело даних, handler_ID визначає обробник, data_tuple визначає послідовність даних, tuple_ID визначає змінну, з якою асоціюються дані.

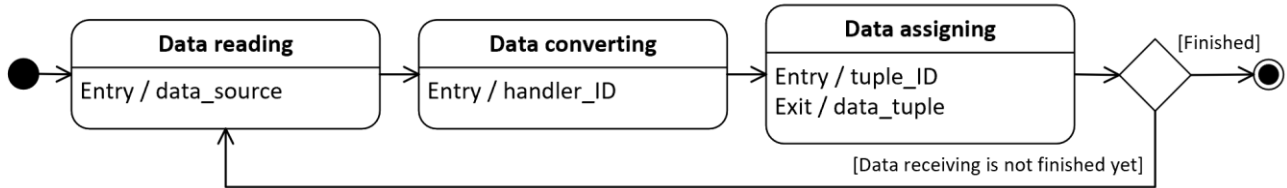


Рис. 11. Діаграма станів оператора DOWNLOAD FROM WITH

Оператор завантаження UPLOAD TO WITH призначений для передавання даних мультиобразу до певного ресурсу. Перетворення вихідних даних виконується з використанням визначеного обробника. Цей оператор визначається синтаксичним правилом [SR5].

$$\begin{aligned} \text{оператор_завантаження} = & \text{UPLOAD, ідентифікатор, TO,} & [\text{SR5}] \\ & \text{ідентифікатор [WITH, ідентифікатор] ;} \end{aligned}$$

Аксіоматична семантика оператора UPLOAD TO WITH визначається формулою [SF7], де P та Q – попереднє та наступне твердження відповідно, C визначає дію над даними, r визначає приймач даних, d визначає змінну, з якою асоціюються дані, z визначає процедуру конвертації даних (обробник).

$$\frac{\{P\} C \{Q\}}{\{P\} \text{UPLOAD } d \text{ TO } r \text{ WITH } z \{Q\}} \quad [\text{SF7}]$$

Оператор відтворення RENDER WITH дозволяє відтворювати дані мультиобразу за допомогою визначеного засобу відтворення. Він визначається синтаксичним правилом [SR6].

$$\begin{aligned} \text{оператор_відтворення} = & \text{RENDER, ідентифікатор, WITH,} & [\text{SR6}] \\ & \text{ідентифікатор ;} \end{aligned}$$

Аксіоматична семантика оператора RENDER WITH визначається формулою [SF8], де P та Q – попереднє та наступне твердження відповідно, C визначає дію над даними, d визначає змінну, з якою асоціюються дані, v визначає процедуру підготовки даних до відтворення (рендер).

$$\frac{\{P\} C \{Q\}}{\{P\} \text{ RENDER } d \text{ WITH } v \{Q\}}$$

[SF8]

Операційна семантика операторів UPLOAD TO WITH та RENDER WITH визначається діаграмами станів, які є аналогічними діаграмі станів на рис. 11.

Семантика оператора розгалуження IF THEN, оператора вибору CASE OF та оператора присвоювання IS є подібною семантиці цих операторів у інших мовах програмування.

Усереднені показники програмного коду, що реалізує управляючі конструкції, для мови програмування ASAMPL та універсальних мов програмування C#, C++ та Python наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Усереднені показники програмного коду

Мова програмування	C#	C++	Python	ASAMPL
Цикломатична складність	3.25	3.25	4	1
Обсяг програмного коду	152.94	171.60	131.52	14.53
Індекс зручності підтримки	54.16	55.26	62.35	89.15

Оскільки мова ASAMPL ґрунтується на апараті алгебраїчної системи агрегатів, то в ній використовуються операції над агрегатами, кортежами та їхніми елементами, зокрема, логічні операції та операції впорядкування.

Запропонована парадигма програмування, методи обчислень та спеціалізована мова програмування ASAMPL дозволяють підвищити ефективність обробки темпоральних мультимодальних даних та спростити процес розроблення прикладного програмного забезпечення систем на основі технології цифрових двійників та технології мультимедіа.

У **п'ятому розділі** розроблено узагальнену архітектуру програмної системи обробки темпоральних мультимодальних даних цифрових двійників та продемонстровано її застосування для розроблення прикладного програмного забезпечення. Зокрема, запропоновано архітектуру програмного забезпечення медичної діагностичної системи та програмних систем для галузі освіти.

Узагальнена архітектура програмної системи обробки темпоральних мультимодальних даних цифрових двійників має вигляд, представлений на рис. 12. Запропонована архітектура може бути конкретизована та адаптована для вирішення задач обробки темпоральних мультимодальних даних цифрових двійників в обраній галузі застосування. Наприклад, архітектура програмного забезпечення медичної діагностичної системи на основі технології цифрових двійників наведена на рис. 13. Ця архітектура може бути застосована для розроблення експертних медичних систем з розширеними функціональними можливостями, а також програмного забезпечення систем класу e-Health, m-Health та Hospital-at-Home.

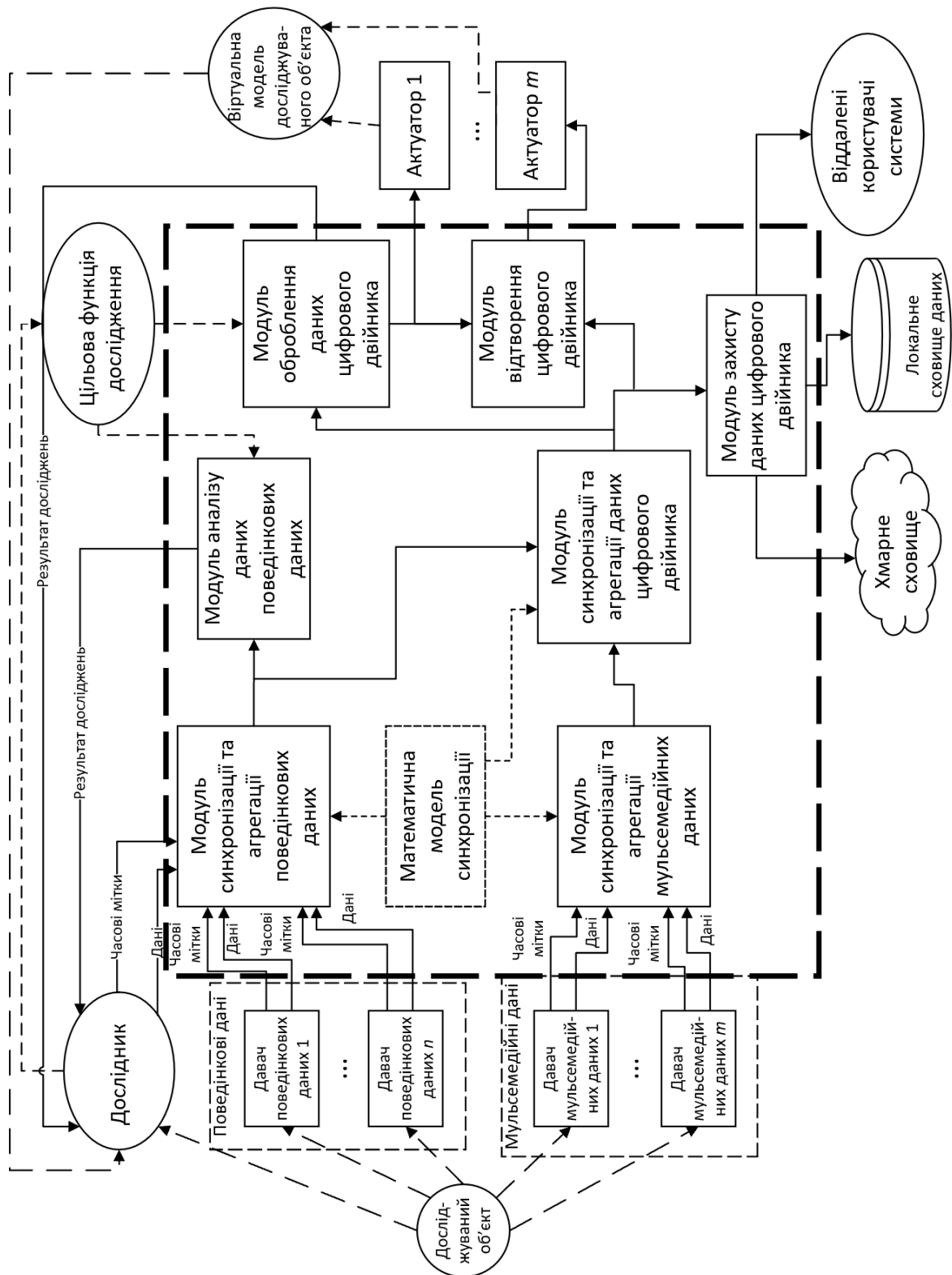


Рис. 12. Узагальнена архітектура програмної системи обробки темпоральних мультимодальних даних цифрових двійників

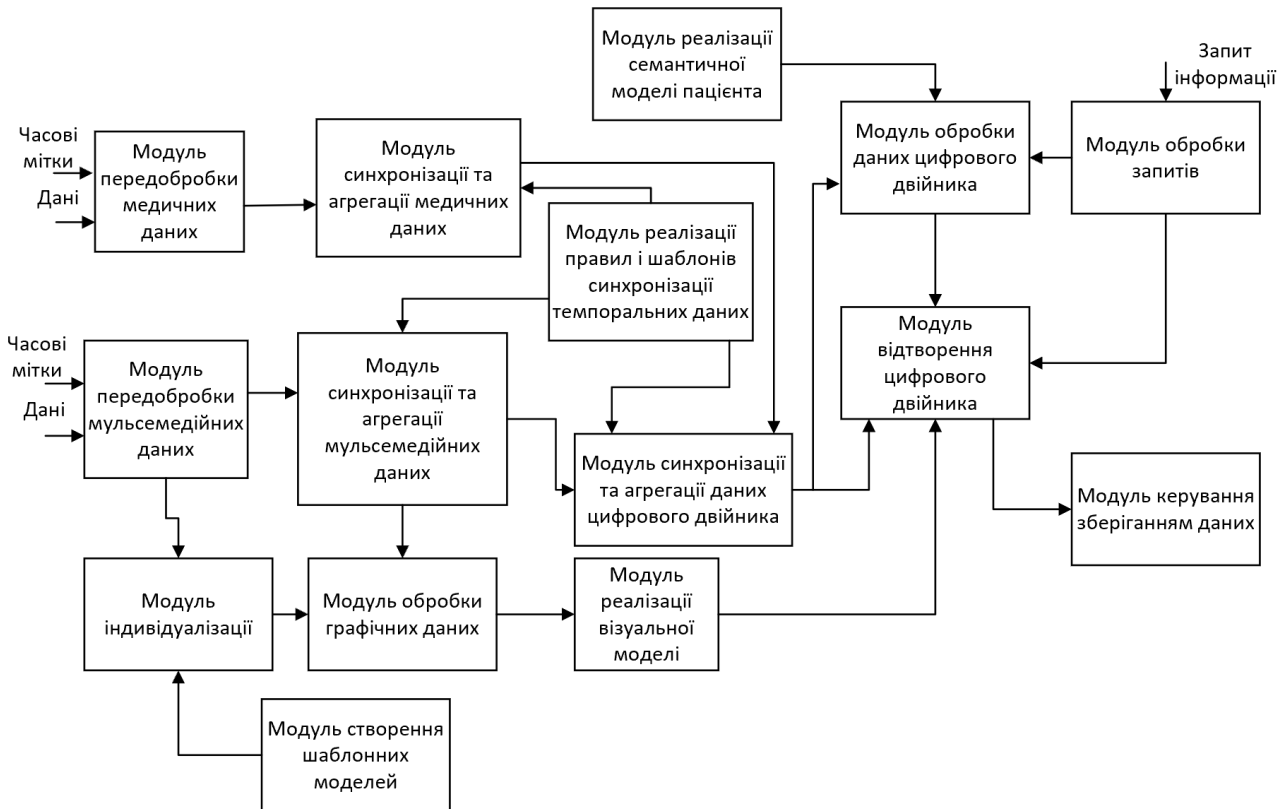


Рис. 13. Архітектура програмного забезпечення медичної діагностичної системи на основі технології цифрових двійників

Узагальнена архітектура програмної системи також може бути адаптована для розроблення на основі технології цифрових двійників програмного забезпечення для галузі освіти, зокрема, онлайн-лабораторій та імерсійних середовищ, які дозволяють особам, що навчаються, досліджувати певний реальний об'єкт, процес або явище у дистанційному режимі.

Онлайн лабораторія – це програмна система, яка дозволяє використовувати віддалене обладнання для проведення експериментів для навчальних цілей. Архітектуру програмного забезпечення онлайн-лабораторії, що ґрунтується на використанні технології цифрових двійників та технології мультимедіа, наведено на рис. 14.

Імерсійне середовище – це апаратно-програмна система, яка дозволяє імітувати присутність користувача у штучно створеній сцені (віртуальному світі), де користувач може взаємодіяти у віртуальний спосіб з реальними та віртуальними об'єктами, процесами або явищами. Архітектуру програмного забезпечення імерсійного середовища наведено на рис. 15.

Таким чином, розроблена узагальнена архітектура програмної системи обробки темпоральних мультимодальних даних цифрових двійників може бути адаптована для розроблення різноманітного програмного забезпечення, що ґрунтується на технології цифрових двійників, зокрема для розроблення програмних систем обробки темпоральних мультимодальних даних для галузі охорони здоров'я і освіти.

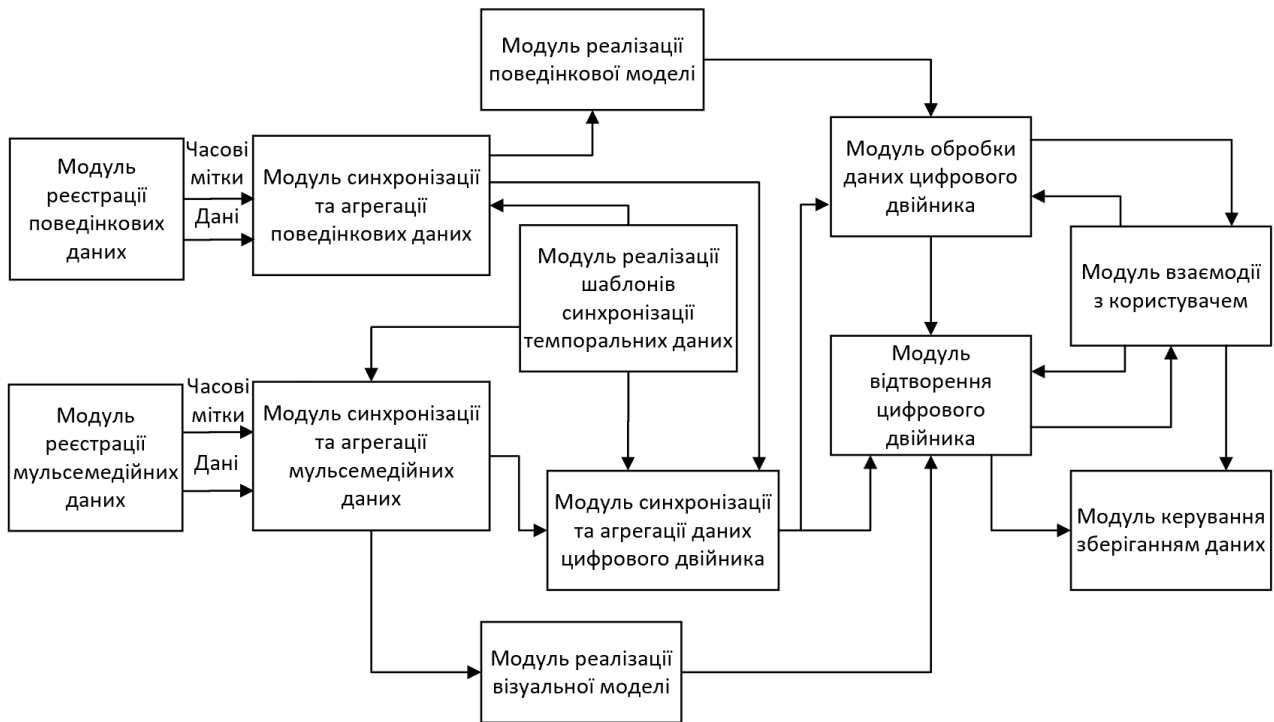


Рис. 14. Архітектура програмного забезпечення онлайн-лабораторії

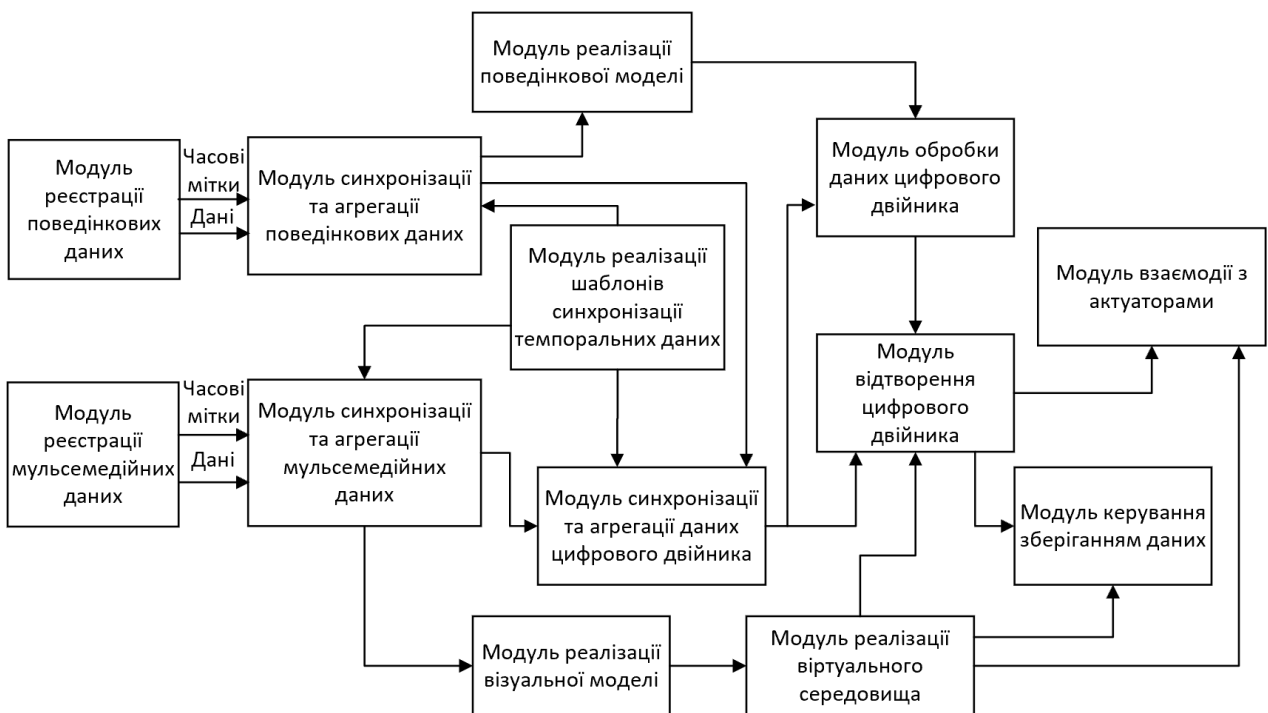


Рис. 15. Архітектура програмного забезпечення іммерсійного середовища

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну проблему – підвищення ефективності обробки темпоральних мультимодальних даних в комп'ютерних системах.

У рамках виконаних наукових досліджень дістали подальший розвиток

основи побудови програмного забезпечення систем обробки темпоральних мультимодальних даних цифрових двійників досліджуваних об'єктів. При цьому отримано такі основні наукові й практичні результати.

1. Показано, що для формальної специфікації моделей цифрового двійника досліджуваного об'єкта доцільно подавати темпоральні мультимодальні дані, які характеризують об'єкт, у вигляді мультиобразу – впорядкованої сукупності синхронізованих даних. Уперше розроблено метод створення мультиобразу досліджуваного об'єкта, який полягає в послідовному виконанні процедур: формування структури даних, декомпозиція мультиобразу на набір часткових мультиобразів, підготовка темпоральних мультимодальних даних, об'єднання, сортування та проріджування даних, що надає можливість створювати універсальне програмне забезпечення систем обробки даних цифрових двійників досліджуваних об'єктів.
2. Доведено, що для синхронізації мультиобразів, які потребують консолідованої обробки, доцільно використовувати правила синхронізації: універсальне правило, базові правила, правила нечіткої синхронізації. Уперше розроблено метод синхронізації мультиобразів, який ґрунтується на застосуванні інтервальних відношень, виконанні правил синхронізації, а також процедур: формування шаблону синхронізації, впорядкування мультиобразів, попарна синхронізація мультиобразів, що робить можливим комплексне дослідження кількох об'єктів.
3. Для опису досліджуваного об'єкта уперше розроблено алгебраїчну систему, що задається трьома множинами – множиною елементів (агрегатів), множиною операцій та множиною відношень. Показано, що визначальними рисами розробленої алгебраїчної системи є: оперування агрегатами – складеними математичними об'єктами, компоненти яких є впорядкованими, врахування порядку слідування компонентів при виконанні операцій, використання операцій впорядкування та спеціальних відношень (частотних, інтервальних) між компонентами агрегатів, що дає змогу спростити алгоритмічне забезпечення процесів обробки темпоральних мультимодальних даних (в тому числі нечітко визначених) завдяки використанню уніфікованих процедур обробки даних.
4. Уперше розроблено моделі цифрового двійника: муксельну модель, часову зв'язну модель та багаторівневу онтологічну модель, які дозволяють представляти досліджуваний об'єкт на різних рівнях абстракції. Муксельна модель призначена для подання деталізованої інформації про об'єкт дослідження та, на відміну від відомих, представляє об'єкт як композицію мукселів – об'ємних елементів, які описуються впорядкованою сукупністю темпоральних мультимодальних даних. Часова зв'язна модель слугує для відображення об'єкта в динаміці зміни його стану та, на відміну від відомих, ґрунтується на використанні часових ключів для формування впорядкованої послідовності станів об'єкта та визначенні зв'язків з джерелами даних для динамічної реєстрації інформації про досліджуваний об'єкт. Багаторівнева онтологічна модель, на відміну від відомих, подає досліджуваний об'єкт як

композицію компонентів, кожен з яких характеризується мультимедійними властивостями та описується поведінковими характеристиками, які визначаються темпоральними мультимодальними даними, отриманими від досліджуваного об'єкта, та може включати до свого складу муксельну та часову зв'язну моделі для деталізованого визначення окремих компонентів об'єкта, що дає змогу описувати досліджуваний об'єкт максимально повно.

5. Уперше запропоновано парадигму програмування для реалізації ефективних обчислень у комп'ютерних системах, яка, на відміну від існуючих, ґрунтується на використанні нової сутності – мультиобразу досліджуваного об'єкта як основного компонента обчислювального процесу, що уможливорює спрощення процесу розроблення програмного забезпечення систем обробки темпоральних мультимодальних даних цифрових двійників досліджуваних об'єктів. Показано, що особливістю цієї парадигми є її зорієнтованість на застосування апарату алгебраїчної системи агрегатів для обробки темпоральних мультимодальних даних, використання синхронізації та агрегації даних різних модальностей як основної складової моделі обчислень, застосування різнорідних джерел даних. Реалізація парадигми програмування дозволяє підвищити ефективність процесу розроблення прикладного програмного забезпечення систем на основі технології цифрових двійників за рахунок зниження складності програмного коду та поліпшення зручності його супроводження.
6. Розроблено спеціалізовану мову програмування ASAMPL, яка реалізує запропоновану парадигму програмування та призначена для розроблення прикладного програмного забезпечення систем обробки темпоральних мультимодальних даних, зокрема мультимедійних та мультимедійних застосунків. Обробка мультимодальних даних ґрунтується на використанні спеціальних структур даних – мультиобразів, які реалізуються за допомогою агрегатів та кортежів. Доведено, що застосування спеціальних операторів обробки темпоральних мультимодальних даних (часовий оператор, оператор заміни, оператори вивантаження та завантаження, оператор відтворення) дозволяє зменшити обсяг програмного коду в 4-6 разів, зменшити цикломатичну складність програми у 2-3 рази та підвищити індекс зручності підтримки програмного коду на 25-30% порівняно з мовами програмування C#, C++, C та Python.
7. Розроблено архітектуру програмної системи для обробки темпоральних мультимодальних даних цифрових двійників та запропоновано її варіанти для галузі охорони здоров'я та для дистанційної освіти. Показано, що особливістю розробленої архітектури є реалізація дворівневої процедури синхронізації та агрегації темпоральних мультимодальних даних, що дозволяє спростити процес розроблення прикладного програмного забезпечення систем обробки темпоральних мультимодальних даних цифрових двійників досліджуваних об'єктів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

За тематикою дисертаційної роботи опубліковано 72 наукові праці, зокрема:

- монографії (1):

1. Mathematical Methods in Interdisciplinary Sciences / Sulema Ye., Kerre E., et al.; editor Chakraverty S. Wiley, USA, 2020. 464 p. ISBN : 9781119585640. DOI : 10.1002/9781119585640. – *Автором розроблено апарат алгебраїчної системи агрегатів та математичні моделі синхронізації мультимодальних даних.*

- статті в закордонних фахових виданнях, які реферуються базою Scopus (6), в тому числі:

- третього квартиля (Q3) (4):

2. Sulema Ye. ASAMPL: Programming Language for Mulsemmedia Data Processing Based on Algebraic System of Aggregates. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018. Vol.725, P. 431–442. ISSN : 21945357. – *Одноосібна робота.*
3. Radchenko Ye., Dychka I., Sulema Ye., Suschuk-Sliusarenko V., Shkurat O. Steganographic Protection Method Based on Huffman Tree. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2019. Vol.902, P. 283–292. ISSN : 21945357. – *Автором запропоновано процедуру аналізу даних.*
4. Hu Zh., Dychka I., Sulema Ye., Valchuk Yu., Shkurat O. Method of medical images similarity estimation based on feature analysis. International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA), 2018. Vol.10. No. 5, P. 14–22. ISSN : 20749058. – *Автором запропоновано спосіб порівняння об'єктів.*
5. Hu Zh., Dychka I., Sulema Ye., Radchenko Ye. Graphical Data Steganographic Protection Method Based on Bits Correspondence Scheme. International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA), 2017. Vol.9. No.8, P.34–40. ISSN : 20749058. – *Автором формалізовано процедуру подання стегоданих.*

- четвертого квартиля (Q4) (1):

6. Sulema Ye., Dychka I., Sulema O. Multimodal Data Representation Models for Virtual, Remote, and Mixed Laboratories Development. Lecture Notes in Networks and Systems, 2018. Vol.47, P. 559–569. ISSN : 23673389. – *Автором розроблені моделі подання даних цифрового двійника.*

- реферується базою Scopus (1):

7. Yevgeniya Sulema, Etienne Kerre, Oksana Shkurat. Vector Image Retrieval Methods Based on Fuzzy Patterns. International Journal of Modern Education and Computer Science (IJMECS). 2020. Vol.12. No.3. P. 8–16. DOI : 10.5815/ijmecs.2020.03.02. – *Автором запропонований базовий спосіб нечіткого пошуку елементів зображення.*

- статті в наукових фахових журналах України (19):

8. Sulema Ye.S., Rvach D.V. Models of computation for Digital Twins data processing. Наукові вісти КПП, 2020. № 2, С. 74–81. – *Автором розроблені моделі обчислень для обробки темпоральних мультимодальних даних та запропоновано спосіб синхронізації та агрегації даних цифрового двійника.*
9. Sulema Ye. Multimodal data processing based on algebraic system of aggregates relations. Radio Electronics, Computer Science, Control, 2020. № 1, С. 169–180. [Категорія «А»]. – *Одноосібна робота.*
10. Sulema Ye., Peschanskii V. Timewise data processing with programming language ASAMPL. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки, 2020. Т.31(70), Част.1. № 1, С. 132–137. – *Автором розроблені синтаксичні правила мови програмування ASAMPL.*
11. Дичка І.А., Сулема Є.С. Модель подання мультимодальних даних для комплексного опису об'єктів спостереження. Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2020. № 1, С. 53–60. – *Автором розроблено муксельну модель подання даних досліджуваного об'єкта.*
12. Sulema Ye., Glinskii V. Semantics and pragmatics of programming language ASAMPL. Проблеми програмування, 2020. № 1, С. 74–83. – *Автором розроблені семантичні правила мови програмування ASAMPL.*
13. Sulema Ye., Rudenko С. A method of artifact compensation for dual quaternion skinning and its application in digital twin models. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 2020. № 1, С. 12–19. – *Автором сформульовано спосіб застосування DQ-моделей для візуалізації цифрових двійників.*
14. Сулема Є.С., Радченко Є.О. Метод стеганографічного захисту мультимедійних даних на основі процедури псевдовипадкового вбудовування. Наукові вісти КПП, 2020. № 1, С. 40–47. – *Автором сформульовано спосіб розміщення стегобітів мультимодальних даних.*
15. Sulema Y.S., Los I.A. Levels-Of-Detail generation method for skeletal meshes. Системні технології, 2019. Т.6. № 125, С. 3–14. – *Автором сформульовано спосіб застосування LOD-моделей для візуалізації цифрових двійників.*
16. Сулема Є.С., Топчієв Б.С. Інтелектуальна колоризація зображень за допомогою генеративних змагальних мереж. Системні технології, 2019. Т.5. № 124. С. 94–103. – *Автором сформульовано критерії застосування генеративних змагальних мереж для аналізу мультимодальних даних.*
17. Dychka I., Sulema Ye., Bukhtiiarov Iu. Digital Twin Information Technology for Biomedical Data Complex Representation and Processing. Вісник Херсонського національного технічного університету, 2019. № 3 (70), С. 112–119. – *Автором розроблено архітектуру програмного забезпечення та запропоновано інформаційну технологію для обробки темпоральних даних.*
18. Dychka I.A., Sulema Ye.S. Ordering Operations in Algebraic System of Aggregates for Multi-Image Data Processing. Наукові вісти КПП, 2019. № 1, С. 15–23. – *Автором запропоновано та визначено операції впорядкування алгебраїчної системи агрегатів.*

- 19.Dychka I.A., Sulema Ye.S. Logical Operations in Algebraic System of Aggregates for Multimodal Data Representation and Processing. Наукові вісті КПП, 2018. № 6, С. 44–52. – *Автором запропоновано та визначено логічні операції алгебраїчної системи агрегатів.*
 - 20.Shkurat O.S., Sulema Ye.S., Dychka A.I. Complicated Shapes Estimation Method for Objects Analysis in Video Surveillance Systems. Наукові вісті КПП, 2018. № 3, С. 53–62. DOI : 10.20535/1810-0546.2018.3.136433. – *Автором формалізовано процедуру аналізу об'єктів у системах відеоспостереження.*
 - 21.Dychka I.A., Sulema Ye.S., Chernykh D.A. Rasterization Method for Voxel Model Cutting. Наукові вісті КПП, 2018. № 2, С. 25–32. – *Автором запропоновано процедуру аналізу воксельної моделі.*
 - 22.Dychka I., Shyrochyn S., Sulema Ye. Analysis of Parallel Computations Efficiency for User's Private Multimedia Data Protection in Clouds. Наукові вісті КПП, 2016. Т.1, С. 40–46. – *Автором виконано аналіз ефективності обчислень.*
 - 23.Резнік К.Ю., Сулема Є.С. Метод локалізації вушної раковини на зображенні людини у профіль. Вісник Хмельницького національного університету, 2014. № 4, С. 113–119. – *Автором запропоновано критерії пошуку елементів на зображенні.*
 - 24.Сулема Є.С., Широчин С.С. Спосіб стеганографічного захисту даних в аудіо-файлах на основі комплементарного образу. Наукові вісті КПП, 2014. Т.61, С. 80–87. – *Автором запропоновано процедуру розміщення аудіо-даних.*
 - 25.Сулема Є.С., Широчин С.С. Спосіб стеганографії зображень на основі комплементарного образу. Захист інформації, 2013. Т.4, С. 345–353. – *Автором запропоновано процедуру розміщення графічних даних.*
 - 26.Сулема Є.С., Широчин С.С. Спосіб стеганографії зображень з фрагментацією стегоданих та розділенням закритого ключа. Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні, 2012. Т.1(22), С. 64–68. – *Автором формалізовано процедуру фрагментації.*
- статті в інших наукових журналах України та за кордоном (7):**
- 27.Sulema Ye., Papusha R. Method of Raster Line Dynamic Smoothing. Геометричне моделювання та інформаційні технології, 2017. № 2 (4), С. 84–89. – *Автором сформульовані критерії якості згладжування.*
 - 28.Сулема Є.С., Широчин С.С. Метод захисту зображень на основі шифрування палітри. Вісник Хмельницького національного університету, 2014. №3, С. 114–119. – *Автором запропоновано спосіб захисту графічних даних.*
 - 29.Сулема Є.С., Ебрахімі Кахоу С. Адаптивний спосіб ущільнення зображень. Вісник Хмельницького національного університету, 2010. № 2, С. 125–131. – *Автором розроблений адаптивний спосіб ущільнення графічних даних.*
 - 30.Павловець О.В., Сулема Є.С. Метод розпізнавання мовних одиниць на основі ADABOOST. Вісник Хмельницького національного університету, 2013. № 4, С. 211–222. – *Автором сформульовані критерії якості мовленнєвого сигналу.*

31. Sulema Ye., Ebrahimi Kahou S. Comparative Study of Image Compression Algorithms. Radioelectronics and Informatics, 2009. № 1. P. 1–8. – *Автором виконано аналіз ефективності алгоритмів ущільнення.*
32. Сулема Є.С., Ебрахімі Кахоу С., Лавренчук С.С. Віртуальна мультимедійна лабораторія: особливості організації та обробки даних. Збірник наукових праць Національного гірничого університету, 2009. Vol.2. № 33. С. 90–96. – *Автором запропоновано архітектуру програмного забезпечення віртуальної мультимедійної лабораторії.*
33. Sulema Ye., Cvjetkovic V. Remote Laboratory for Supporting e-Studies in Electronics. International Journal of Online Engineering, 2006. Vol 2, № 1, P. 1–9. – *Автором запропоновано архітектуру програмного забезпечення онлайн лабораторії.*

- матеріали міжнародних наукових конференцій, що реферується базою Scopus (10):

34. Sulema Ye., Amram N., Aleshchenko O., Sivak O. Quality of Experience Estimation for WebRTC-based Video Streaming. Proceedings of the 24th International Conference «European Wireless» (EW2018). Catania, Italy, 2018. P. 1–6. – *Автором запропоновано архітектуру програмної системи для потокової передачі відео, визначено процедури та сформульовано задачі експериментальної частини дослідження.*
35. Dychka I., Sulema Ye., Rudenko C. A Mathematical Model of Microsurface Normal Distribution for Specular Bidirectional Reflectance Distribution Function. Proceedings of the International Conference «Advanced Computer Information Technologies» (ACIT 2018). Ceske Budejovice, Czechia, 2018, P. 30–33. – *Автором проведено аналіз якості візуалізації при дзеркальному відбитті.*
36. Sulema Ye., Rozinaj G. WebRTC-based 3D Videoconferencing System. Proceedings of 59th International Symposium ELMAR-2017. Zadar, Croatia, 2017, P. 193–196. – *Автором запропоновано архітектуру програмного забезпечення системи 3D відео-конференцзв'язку та розроблено вдосконалену процедуру 3D візуалізації.*
37. Sulema Ye., Rozinaj G. Multimodal Information in Telecommunication Systems: Analysis of Technological Readiness. Proceedings of 58th International Symposium ELMAR-2016. Zadar, Croatia, 2016, P. 119–122. – *Автором виконано аналіз рівня технологічної готовності технології мультимедіа та аналіз можливості передавання мультимедійної інформації каналами зв'язку.*
38. Sulema Ye. Mulsemmedia Vs. Multimedia: State of the Art and Future Trends (Invited Paper). Proceedings of the 23rd IEEE International Conference on Systems, Signals and Image Processing IWSSIP2016. Bratislava, Slovakia, 2016, P. 19–23. – *Одноосібна робота.*
39. Sulema Ye. Image Protection Method Based on Binary Operations. Proceedings of the 23rd IEEE International Conference on Systems, Signals and Image Processing IWSSIP2016. Bratislava, Slovakia, 2016, P. 295–298. – *Одноосібна робота.*

40. Sulema Ye. Haptic Interaction in Educational Applications. Proceedings of the International Conference on Interactive Mobile Communication, Technologies and Learning IMCL2015. Thessaloniki, Greece, 2015, P. 312–314. – *Одноосібна робота.*
41. Kovács P.T., Murray N., Rozinaj G., Sulema Ye., Rybárová R. Application of Immersive Technologies for Education: State of The Art. Proceedings of the International Conference on Interactive Mobile Communication, Technologies and Learning IMCL2015. Thessaloniki, Greece, 2015, P. 283–288. – *Автором виконано аналіз апаратного забезпечення для обробки тактильних даних.*
42. Sulema Ye., Ebrahimi Kahou S. Statistical Approach to Image Classification. Proceedings of the IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics AQTR 2010. Cluj-Napoca, Romania, 2010, Vol. 3, P. 1–4. – *Автором запропоновано спосіб статистичної класифікації зображень.*
43. Sulema Ye., Ebrahimi Kahou S. Image Compression: Comparative Analysis of Basic Algorithms. Proceedings of the IEEE International Conference EWDTs'09. Moscow, Russia, 2009, P. 534–537. – *Автором виконано аналіз ступеня ущільнення графічних даних.*

- матеріали науково-технічних конференцій (29):

44. Pester A., Sulema Ye. Multimodal Data Representation Based on Multi-Image Concept for Immersive Environments and Online Labs Development. Proceedings of the International Conference on Interactive Collaborative and Blended Learning ICBL2019. Santiago de Cuba, Cuba, 2019. P. 1–18. – *Автором розроблено метод подання даних мультимедіа досліджуваного об'єкту та архітектуру онлайн лабораторії.*
45. Dychka I., Sulema O., Salenko A., Sulema Ye. Augmented Reality Application Based on Information Barcoding. Proceedings of the International Conference on Interactive Mobile Communication Technologies and Learning IMCL2019. Thessaloniki, Greece, 2019. P. 1–12. – *Автором запропоновано архітектуру програмного забезпечення та спосіб застосування доповненої реальності.*
46. Sulema Ye., Rudenko C. Fast Approximated Subsurface Scattering. Proceedings of 12th International Workshop on Multimedia Information and Communication Technologies Redžúr 2018. Bratislava, Slovakia, 2018. P. 1–4. – *Автором запропоновано критерії оцінювання якості моделювання ефекту відбиття.*
47. Shkurat O., Sulema Ye., Suschuk-Sliusarenko V., Dychka A. Image Segmentation Method Based on Statistical Parameters of Homogeneous Data Set. Proceedings of International Conference of Artificial Intelligence, Medical Engineering, Education, 2018. 12 p. – *Автором визначено критерії якості сегментації медичних зображень.*
48. Sulema Ye., Bartkoviak A., Sokolovska A., Kapura A., Ohoiko M., Hurov V. Smart Room Software Based on Microsoft Kinect and Speech Synthesizing. Proceedings of 11th International Workshop on Multimedia Information and Communication Technologies Redžúr 2017. Bratislava, Slovakia, 2017. P. 71–74. – *Автором запропоновано архітектуру програмного забезпечення для імерсійного*

середовища.

49. Sulema Ye., Zaichuk V., Chernyk D. Voxel-to-Polygonal Model Conversion Method. Proceedings of 11th International Workshop on Multimedia Information and Communication Technologies Redžúr 2017. Bratislava, Slovakia, 2017, P. 67–70. – *Автором формалізовано процедуру перетворення даних воксельної моделі.*
50. Радченко Є.О., Сулема Є.С. Спосіб стеганографічного захисту графічних даних на основі схеми відповідності бітів та аналізу візуальних властивостей контейнера. Матеріали доповідей Шостої Міжнародної науково-практичної конференції з сучасних проблем кодування, захисту й ущільнення інформації. Вінниця, Україна, 2017. С. 51–53. – *Автором сформульовані критерії аналізу стеганографічної схеми розміщення стегобітів.*
51. Sulema Ye., Zaichuk V., Chernykh D. Haptic Interaction in 3D World with Use of Data Glove and Web-Camera. Proceedings of 10th International Workshop on Multimedia and Signal Processing Redžúr 2016. Slovakia, 2016, P. 45–48. – *Автором запропоновано спосіб обробки тактильних даних.*
52. Sulema Y.S., Shkurat O.S. Information System for Archival Medical Images Automated Processing. Book of Abstracts of the 3rd International Conference Health Technology Management HTM-2016. Chisinau, Moldova, 2016, P. 72. – *Автором запропоновано архітектуру програмної системи обробки архівних медичних зображень.*
53. Sulema Ye., Valchuk Yu. Brain Tissue Image Adjustment Method. Book of Abstracts of the AMMODIT and final EUMLS Workshop. Germany, 2016, P. 31–32. – *Автором запропоновано метод поліпшення якості медичних зображень (гістологічні зображення тканин мозку).*
54. Sulema Ye., Shyrochyn S., Protection of Personal Graphic User Data Transmission in Computer Networks. Proceedings of International conference «Information Technology. Problems and Solutions». Ufa, Russia, 2013, P. 7–10. – *Автором формалізовано процедуру стеганографічного захисту графічних даних.*
55. Сулема Є.С., Широчин С.С. Аналіз ефективності паралельної реалізації алгоритмів захисту зображень. Збірник наукових праць за матеріалами Восьмої всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій» АПКТ-2014. Хмельницький, Україна, 2014, С. 335–342. – *Автором виконано аналіз ефективності паралельної реалізації алгоритмів захисту.*
56. Сулема Є.С., Широчин С.С. Підвищення стійкості LSB-стегосистем шляхом аналізу і корекції характеристик контейнера. Збірник наукових праць за матеріалами Шостої всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій» АПКТ-2012. Хмельницький, Україна, 2012, С. 319–327. – *Автором сформульовані критерії визначення оптимальних характеристик контейнера стегоданих.*
57. Сулема Є.С., Гуренко О. Спосіб обмеження прав доступу до елементів зображення. Збірник наукових праць за матеріалами Шостої всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних

- технологій» АПКТ-2012. Хмельницький, Україна, 2012, С. 309–313. – *Автором сформульовано процедуру оброблення графічних даних.*
58. Сулема Є.С., Малашихіна А. Обробка аудіо-сигналів у віртуальній мультимедійній лабораторії. Збірник наукових праць за матеріалами Шостої всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій» АПКТ-2012. Хмельницький, Україна, 2012, С. 314–318. – *Автором розроблено процедуру обробки аудіо-даних.*
59. Сулема Є.С., Гнатейко В. Дослідження методів пошуку музичних файлів. Збірник наукових праць за матеріалами Шостої всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій» АПКТ-2012. Хмельницький, Україна, 2012, С. 328–332. – *Автором запропоновано процедуру пошуку ознак у мультимедійних файлах.*
60. Сулема Є.С., Гуренко О. Модифікований алгоритм пошуку текстової інформації на зображеннях. Збірник наукових праць за матеріалами П'ятої всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій» АПКТ-2011. Хмельницький, Україна, 2011, С. 202–206. – *Автором сформульовані критерії пошуку тексту на зображеннях.*
61. Сулема Є.С., Широчин С.С. Засоби подання інформації неграфічного характеру в картографічних зображеннях. Збірник наукових праць за матеріалами П'ятої всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій» АПКТ-2011. Хмельницький, Україна, 2011, С. 207–213. – *Автором сформульовані критерії якості картографічних зображень.*
62. Сулема Є.С., Заворотній А. Способ розпознавання музикальних звукових образів. Збірник наукових праць за матеріалами П'ятої всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних технологій» АПКТ-2011. Хмельницький, Україна, 2011, С. 214–218. – *Автором сформульовані критерії якості розпізнавання аудіо-сигналу.*
63. Сулема Є.С., Широчин С.С. Критерії пошуку оптимального розташування блоків стеганографічних даних в контейнері. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Системний аналіз та інформаційні технології» SAIT 2011. Київ, Україна, 2011, С. 516. – *Автором сформульовані критерії пошуку оптимального місця розташування стегоданих.*
64. Сулема Е., Эбрахими Кахоу С. Пиксельно-объектный способ классификации изображений. Труды десятой международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии». Одесса, 2009. Т.1, С. 133. – *Автором розроблено піксельно-об'єктний спосіб класифікації зображень.*
65. Сулема Є.С., Ебрахімі Кахоу С. Покращення якості ущільнених зображень в автоматизованих системах відео-спостереження. Матеріали XVI Міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2009». Чернівці, Україна, 2009, С. 54. – *Автором сформульовано спосіб поліпшення якості ущільнення графічних даних у системах відеоспостереження.*

66. Sulema Ye., Radchuk V. Audio Processing in the Virtual Multimedia Laboratory. Proceedings of the International Conference ICL2007. Villach, Austria, 2007. P. 1–5. – *Автором розроблено архітектуру програмного забезпечення віртуальної медійної лабораторії.*
67. Sulema Ye., Grebelnykova V. The Optimization of the Video Data Compression Based on Wavelet Transformation. Proceedings of the Conference on Interactive Computer Aided Learning ICL2006. Villach, Austria, 2006. P. 1–6. – *Автором запропоновано спосіб оптимізації ущільнення відеоданих.*
68. Sulema Ye. Multimedia and Computer Technologies in e-Learning. Proceedings of the International Conference «Informational Technologies for Rural Development». Jelgava, Latvia, 2006. P. 1–4. – *Одноосібна робота.*
69. Sulema Ye. Multimedia in Computer Networks: Technologies and Applications. Proceedings of the 10th International Netties Conference. St. Pölten, Austria, 2005. P. 1–5. – *Одноосібна робота.*
70. Sulema Ye. Using Video and Static Panoramic Images in E-Learning. Proceedings of the International Conference ICL2005. Villach, Austria, 2005. P. 1–4. – *Одноосібна робота.*
71. Sulema Ye., Sherman Eu. Secure Data Transfer in Networks. Proceedings of the Symposium on Remote Engineering Virtual Instrumentation REV 2004. Austria, 2004. P. 1–8. – *Автором сформульовані вимоги до протоколу передавання мультимедійних даних.*
72. Sulema Ye., Bhattacharya A., Murray N. Mulsemedia Data Representation Based on Multi-Image Concept. Proceedings of the International Conference on Interactive Mobile Communication Technologies and Learning IMCL2019. Thessaloniki, Greece, 2019. P. 1–12. – *Автором розроблено метод створення мультиобrazу мультимедійного об'єкту.*

АНОТАЦІЯ

Сулема Є. С. Методи, моделі та засоби обробки мультимодальних даних цифрових двійників досліджуваних об'єктів. – *На правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.03 – Математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-технічної проблеми – підвищення ефективності обробки темпоральних мультимодальних даних у комп'ютерних системах.

У роботі розроблено теоретичні основи подання темпоральних мультимодальних даних цифрового двійника для опису досліджуваного об'єкта. Розроблено апарат алгебраїчної системи агрегатів, запропоновано концепцію мультиобrazу та розроблено метод створення мультиобrazу досліджуваного об'єкта і метод синхронізації мультиобrazів, які дозволяють виконувати формальну специфікацію цифрового двійника та опис досліджуваного об'єкта.

Розроблено моделі цифрового двійника, які дозволяють представляти досліджуваний об'єкт на різних рівнях абстракції.

Запропоновано парадигму програмування мультиобразів, мову програмування ASAMPL та моделі обчислень, які дозволяють спростити процес розроблення програмного забезпечення систем обробки темпоральних мультимодальних даних цифрових двійників досліджуваних об'єктів. Розроблено архітектуру програмної системи обробки темпоральних мультимодальних даних цифрових двійників.

Ключові слова: прикладне програмне забезпечення, парадигма програмування, мова програмування, модель досліджуваного об'єкта, темпоральні мультимодальні дані, цифровий двійник, мультимедіа.

АННОТАЦИЯ

Сулема Е. С. Методы, модели и средства обработки мультимодальных данных цифровых двойников исследуемых объектов. – *На правах рукописи.*

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.05.03 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин и систем. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2020.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической проблемы – повышению эффективности обработки темпоральных мультимодальных данных в компьютерных системах.

В работе разработаны теоретические основы представления темпоральных мультимодальных данных цифрового двойника для описания изучаемого объекта. Разработан аппарат алгебраической системы агрегатов, предложена концепция мультиобраза и разработаны метод создания мультиобраза исследуемого объекта и метод синхронизации мультиобразов, которые дают возможность осуществлять формальную спецификацию цифрового двойника и описание изучаемого объекта. Разработаны модели цифрового двойника, которые позволяют представлять исследуемый объект на разных уровнях абстракции.

Разработаны парадигма программирования мультиобразов, язык программирования ASAMPL и модели вычислений, которые дают возможность упростить процесс разработки программного обеспечения систем обработки темпоральных мультимодальных данных цифровых двойников исследуемых объектов. Разработана архитектура программной системы обработки темпоральных мультимодальных данных цифровых двойников.

Ключевые слова: прикладное программное обеспечение, парадигма программирования, язык программирования, модель изучаемого объекта, темпоральные мультимодальные данные, цифровой двойник, мультимедиа.

ABSTRACT

Sulema Ye. S. Methods, Models, and Means of Researched Objects Digital Twins Multimodal Data Processing. – *On the rights of the Manuscript.*

The thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 01.05.03 – Mathematical Support and Software of Computers and Systems. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to solving a topical scientific and technical problem of the efficiency increasing of temporal multimodal data processing in computer systems.

In the work, a theoretical basis for representing the temporal multimodal data of a digital twin to describe a researched object is developed. An apparatus of the algebraic system of aggregates is developed as a tool for such a description. A distinguishing feature of the proposed algebraic system is a consideration of the elements order when performing operations as well as the introduction of ordering operations and special relations (frequency, interval) between the elements. The operations and relations between the elements of the proposed algebraic system, including fuzzy elements, are defined. The concept of a multi-image is proposed for the formal specification of digital twin models and the description of the researched object.

A method for creating a multi-image of a researched object is developed; it consists in the sequential implementation of procedures for the data structure forming, the multi-image specification decomposition, temporal multimodal data preparing, data fusion, sorting, and singling. A method for multi-images synchronization is proposed; it consists in the implementation of procedures for synchronization template forming, multi-images ordering, and pairwise synchronization of multi-images. A method for digital twin graphical data adaptive compression is developed; it is based on the application of morphological operations and defining regions of interest. A method of confidential storage of digital twin data is formulated; a distinguishing feature of this method is the application of the data protection procedure depending on the data category. The application of these methods enables developing the complete set of software for digital twins technology support.

Three digital twin models are developed: the muxel model, the temporal linked model, and the multilevel ontological model. These models allow to represent the object at different levels of abstraction. The muxel model is designed to provide detailed information about the researched object. The temporal linked model is used to represent the object in the dynamics of changes in its state. In a multilevel ontological model, the researched object is represented as a composition of its components. The combining of these models enables the representation of the researched object as detailed as possible.

The paradigm of multi-images programming for digital twins temporal multimodal data processing is proposed; its distinguishing feature is the use of a new entity, which is a multi-image of the researched object, as the main component of the computational process that allows to simplify software development for digital twins

temporal multimodal data processing systems. Features of this paradigm are the use of the apparatus of the algebraic system of aggregates for processing temporal multimodal data; the use of temporal multimodal data synchronization and aggregation procedures as a main component of the computational model; the focus on using heterogeneous data sources. To implement the multi-image programming paradigm, a basic computational model, and a computational model for digital twins technology are proposed. The ASAMPL programming language for processing temporal multimodal data is developed; its syntax and semantics are presented, and the application of the ASAMPL programming language for solving applied problems is demonstrated.

An architecture of the software system for digital twins temporal multimodal data processing is proposed and the options of its application for software development for health care and distance education are shown and discussed. A feature of the developed architecture is the use of a two-level procedure for synchronization and aggregation of temporal multimodal data. The proposed approach provides the efficient processing of temporal multimodal data as well as it enables reducing programming man-hours due to simplifying the process of applied software development for digital twins temporal multimodal data processing systems.

Key words: applied software, programming paradigm, programming language, researched object model, temporal multimodal data, digital twin, mulsemmedia.